

行政院原子能委員會
九十四年度委託研究計畫

高價值電漿熔岩資源化產品的製程發展與推廣
應用之研究
(期末報告)

計畫編號：942001 INER 008

受委託機關(構)：財團法人國立臺北科技大學材資系教育基金會

計畫主持人：鄭大偉

共同主持人：翁祖炘、朱 瑾、陳永翔、黃明政、陳思先

核研所共同計畫主持人：邱文通、揚昇府

報告日期：94 年 12 月

摘要

台灣地區每年自都市垃圾焚化爐產生約 150 萬噸的焚化灰渣，這些焚化灰渣含有許多重金屬及毒性有機物等有害物質，若未加以妥善處理，勢必造成嚴重的二次污染。利用電漿高溫熔融處理技術，可將有害焚化灰渣予以減容、無害化，成為永久安定化之玻璃體水淬熔渣，再進一步於熔渣中添加發泡劑及助熔劑等添加劑，資源化製成具有高經濟價值的泡沫玻璃材料，提供熔渣資源化之再生途徑。

本研究所使用焚化灰渣為台灣北部某大型都市垃圾焚化爐之反應灰、集塵灰及底灰，依照一定的比例混合後，經核能研究所非放射性先導型電漿焚化熔融爐高溫熔融後，水淬產生玻璃質熔渣。將水淬熔渣經由 60mesh 白雲石發泡製程、100mesh 白雲石發泡製程及硫酸鈉發泡製程等方法，添加發泡劑及助熔劑於 780°C~950°C 進行發泡熱處理產生泡沫玻璃。經分析比較後發現使用硫酸鈉發泡劑製程之泡沫玻璃，於硫酸鈉添加量 6~8%，溫度 820°C 時，發泡效果最佳，孔隙率可達 65%，抗壓強度也較優良，具有 2.5~3.5MPa，未來若將其應用於防火隔熱材料上，可以達到環保及高價值資源化之目標。

Abstract

In Taiwan, it is estimated that over 1.5 million tonnes of incineration ash will be generated each year after 2003. The incinerator residuals have approximately one fifth the weight of the raw refuse, while heavy metals and dioxins are condensed into incinerator ashes causing higher potential harm to the environment. Hence, the ash residues need further treatment in order to immobilize the harmful materials into a stable state. In melt vitrification, the heat generated from a plasma furnace is used to treat hazardous waste containing metals and/or organics at temperatures range 1300–1500°C. The thermal molten vitrification yields a glass-like, large volume/weight reductions and leach-resistant monolith slag, which is environmentally safe for be reused as a foam glass.

The feasibility of recycling the incinerator fly ash from domestic waste incineration by developing a process to produce glass and foaming glass materials has been investigated. Quenched glass was obtained by high temperature plasma molten technology. A foaming heat treatment process was carried out at various temperatures (i.e. 780 ~950) to obtain various porosity microstructure materials from quenched glass. The objective of this study are directed towards the effect of temperature and material additions, such as foaming/flux agent. The products can be fabricated for fire-resistant construction purposes and have great potential for engineering applications.

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
目錄.....	iii
第一章 計畫緣起及目的.....	1
第二章 文獻回顧.....	3
2.1 國內垃圾處理現況.....	3
2.2 焚化灰渣之處理及資源化技術.....	7
2.2.1 國外灰渣之處理方式.....	7
2.2.2 國內灰渣之處理方式.....	10
2.2.3 焚化灰渣之資源化技術與利用.....	11
2.3 電漿玻璃化處理技術.....	15
2.4 熔渣資源化技術.....	17
2.4.1 泡沫玻璃.....	17
2.4.2 泡沫玻璃的生產方法.....	18
2.4.3 泡沫玻璃之物理性質.....	20
2.4.4 影響泡沫玻璃性能之因素.....	22
2.4.5 泡沫玻璃之應用.....	23

2.5 發泡劑之種類與研究.....	24
2.6 廢棄物資源化製成泡沫玻璃之相關研究.....	27
第三章 研究方法及步驟.....	31
3.1 實驗材料.....	31
3.1.1 水淬熔渣.....	31
3.1.2 發泡劑.....	32
3.1.3 助熔劑.....	32
3.1.4 發泡穩定劑.....	33
3.1.5 其他.....	33
3.2 實驗設備及測試與分析方法.....	34
3.2.1 可程式控制高溫電爐.....	34
3.2.2 熱差/質差分析.....	34
3.2.3 物理性質試驗.....	35
3.2.4 抗壓強度試驗.....	36
3.2.5 熱傳導試驗.....	36
3.4 實驗流程.....	38
3.4.1 原料之性質分析.....	38
3.4.2 60mesh 白雲石發泡製程.....	38
3.4.2 100mesh 白雲石發泡製程.....	39

3.4.3 硫酸鈉發泡製程.....	39
第四章 實驗結果.....	42
4.1 水淬熔渣之性質分析結果.....	42
4.1.1 基本物理性質.....	42
4.1.2 熔渣之粒徑分析.....	43
4.1.3 水淬熔渣之 X 光繞射分析.....	46
4.1.4 水淬熔渣之化學成分分析.....	48
4.1.5 熱差分析結果.....	48
4.2 白雲石發泡製程發泡溫度對泡沫玻璃性質之影響.....	52
4.2.1 發泡溫度對泡沫玻璃基本物理性質之影響.....	52
4.2.2 發泡溫度對泡沫玻璃機械強度之影響.....	57
4.3 白雲石粒徑對泡沫玻璃性質之影響.....	58
4.3.1 白雲石粒徑對泡沫玻璃基本物理性質之影響.....	58
4.3.2 粒徑對泡沫玻璃機械強度之影響.....	67
4.4 硫酸鈉發泡製程發泡溫度對泡沫玻璃性質之影響.....	69
4.4.1 發泡溫度與添加量對泡沫玻璃基本物理性質之影響.....	69
4.4.2 發泡溫度與添加量對泡沫玻璃機械強度之影響.....	76
4.4.3 發泡溫度與添加量對泡沫玻璃熱傳導率之影響.....	77
4.4.4 泡沫玻璃孔隙率與各項性質之關係.....	78

第五章 結論與建議	80
5.1 結論.....	80
5.2 建議.....	81
參考文獻	82

第一章 計畫緣起及目的

台灣地區由於社會經濟快速發展的結果，一般廢棄物數量急遽增加，近年因資源回收工作之推動，雖然有效降低一般廢棄物之產生量，但是根據資料顯示，目前台灣地區一般廢棄物每年仍有 850 萬噸的產生量[楊金鐘、陳炫邑，1993]。政府自民國 73 年開始推動「垃圾處理計畫」，致力建設大型垃圾焚化廠，並預計在民國 94 年興建完成 30 座大型都市焚化爐，以解決垃圾處理問題，焚化處理方法也逐漸取代傳統的掩埋法。然而焚化法並非全無缺點，一般垃圾經焚化處理雖可有效減量，但仍會產生 15 % 的灰渣，相當於每年產生約 150 萬噸的垃圾焚化灰渣。這些焚化灰渣含有許多重金屬及毒性有機物等有害物質[王鯤生等，1997；章裕民，1993]，若未加以妥善處理，勢必造成嚴重的二次污染。

一般對於焚化灰渣的處理均採用固化法，但是固化法處理後的試體在最終處置場中若受弱酸淋洗，將會破壞固化試體，使重金屬再度溶出。且固化法處理焚化灰渣有體積增大的缺點。相同的，醫療廢棄物及污泥等廢棄物也面臨相同的問題。在目前環保意識抬頭，掩埋場地難求的情況下，為避免固化法的缺點，採用電漿高溫熔融處理技術，將有害焚化灰渣予以減容、無害化，成為永久安定化玻璃體之熔渣，再進一步的資源化，為另一可行且較佳的方法。

因此為配合政府「電漿焚化熔融處理有害廢棄物產業化應用與發展」施政目標，行政院原子能委員會核能研究所即成立電漿熔融專案計畫，開發廢棄資源再生利用技術，期能加速電漿熔岩資源化技術之開發。本計畫擬將電漿高溫熔融處理後之玻璃質熔渣予以添加發泡劑資源化製成具有高經濟價值的泡沫玻璃隔熱材料。

第二章 文獻回顧

2.1 國內垃圾處理現況

行政院環境保護署於八十年九月訂定「台灣地區垃圾資源回收（焚化）廠興建工程計畫」，計畫興建公有公營或公有民營垃圾焚化廠21座，如表2-1所列，以及於八十五年三月訂定「鼓勵公民營機構興建營運垃圾焚化廠推動方案」，推動興建民有民營（BOT/BOO）垃圾焚化廠15座。合計興建36座大型垃圾焚化廠，預估每日可焚化處理約30,400公噸家戶垃圾。

目前「台灣地區垃圾資源回收（焚化）廠興建工程計畫」已有18座完工運轉，剩餘3座持續施工辦理中。在「鼓勵公民營機構（BOO/BOT）興建營運垃圾焚化廠推動方案」，原本預定興建15座垃圾焚化廠，但因各縣市政府近數年來推行垃圾減量、資源回收展現具體成效及垃圾實際產生量的現實面下，取消9座垃圾焚化廠的興設計畫，如表2-2所列。因此合計興建共27座大型垃圾焚化廠，當全數完工後，每日設計焚化處理量為25,400公噸，每年因應焚化爐停爐歲修、檢修保養需要，依目前國際通用開機運轉率百分之八十五標準估計，每日實際焚化處理量約達21,590公噸，而目前台灣地區每日一般廢棄物產生量約20,000公噸，故除可處理家庭用戶垃圾外，並可支援處理部分一般事業廢棄物。但都市垃圾經焚化處理後，每日將產生約6,000公噸的底灰與1,500公噸的飛灰 [行政院環保署網站，2005]。

表 2-1 台灣地區垃圾資源回收(焚化)廠興建工程計畫執行現況

編號	設置地點	容量(公噸/日)	負責興建機關	完工運轉/預定 完工日期(年月)
1	台北市內湖	900	台北市政府環 保局	81.01
2	台北市木柵	1,500		83.03
3	台北市北投	1,800		88.05
4	高雄市中區	900	高雄市政府環 保局	88.09
5	高雄市南區	1,800		89.01
6	台中市	900	前台灣省政府 環保處	84.05
7	嘉義市	300		87.11
8	台南市	900		88.02
9	台北縣新店	900	行政院環境保 護署	83.09
10	台北縣樹林	1,350		84.08
11	台北縣八里	1,350		90.09
12	新竹市	900		89.08
13	高雄縣仁武	1,350		89.02
14	彰化縣溪州	900		89.09
15	屏東縣崁頂	900		89.12
16	台中縣后里	900		89.04
17	高雄縣岡山	1,350		90.02
18	嘉義縣鹿草	900		90.12
19	基隆市	600		施工中 94.12
20	宜蘭縣利澤	600		施工中 94.12
21	台南縣永康	900		施工中 95.12
	合計	21,900		

註：完工營運中18座，施工中3座。

表 2-2 鼓勵公民營機構興建營運垃圾焚化廠推動方案執行狀況表

編號	設置地點	容量(公噸/日)	辦理方式	完工運轉/預定完工日期(年月)
1	桃園縣	1,200	BOO	90年10月9日
2	新竹縣	300	BOO	施工中
3	苗栗縣	500	BOT	施工中
4	台中縣烏日鄉	600	BOT	93年9月6日
5	雲林縣	600	BOO	施工中
6	台東縣	300	BOO	施工中
	合計	3,500		

台灣地區垃圾清運處理方法如表 2-3 所示，因衛生掩埋場的掩埋容量趨近於飽和及都市垃圾焚化廠陸續的完成興建，故垃圾的清運方式已漸漸由焚化的方式取代掩埋。93 年度全國垃圾依處理方式進行區分[行政院環保署，2004]，焚化量為 4,304,987 公噸 (73.71%)、掩埋量為 1,518,861 公噸 (26.01%)、堆置量為 15,004 公噸 (0.26%)、其他為 1,201 公噸 (0.02%)，垃圾清運總量為 5,840,052 公噸，資源回收量為 1,387,371 公噸，而平均每人每日的垃圾清運量為 0.71 公斤。雖然垃圾焚化廠可以有效解決垃圾處理的問題，但垃圾經焚燒後仍會產生一定數量的焚化灰渣，所以如何安全及有效的處理此類灰渣是目前所需面對的課題。

表 2-3 台灣地區垃圾清運處理概況

年度	清運總量 (萬公噸)	平均每日處理量 (%)				平均每人 每日清運 量(公斤)
		焚化	掩埋	堆置	其他	
77	589.85	1.55	90.21	7.09	0.61	0.86
78	625.87	1.36	88.98	9.45	0.20	0.90
79	684.48	1.14	88.04	9.17	1.65	0.96
80	723.90	0.40	93.01	6.52	0.08	1.00
81	800.12	3.19	90.44	6.27	0.10	1.09
82	821.73	3.03	91.76	5.21	0.00	1.10
83	849.28	4.86	89.87	5.25	0.02	1.12
84	870.77	14.94	79.24	5.74	0.07	1.14
85	873.64	15.62	79.15	5.21	0.03	1.14
86	888.08	19.05	75.06	5.73	0.16	1.14
87	888.05	19.61	75.30	5.09	0.01	1.14
88	856.57	23.18	71.42	5.17	0.22	1.08
89	787.55	41.01	57.38	1.57	0.04	0.98
90	725.48	51.51	47.28	1.20	0.01	0.90
91	672.36	64.19	34.82	0.98	0.01	0.82
92	613.91	70.11	29.54	0.34	0.01	0.74
93	584.01	73.71	26.01	0.26	0.02	0.71

2.2 焚化灰渣之處理及資源化技術

2.2.1 國外灰渣之處理方式

(1) 掩埋處理

美國在 1994 年最高法院判決垃圾焚化灰渣適用於有害廢棄物管理規定，無論底灰、飛灰或混合灰，都必須依據毒物特性溶出試驗測試，若灰渣經 TCLP 檢測結果符合規定，灰渣可以一般事業廢棄物方式掩埋，若無法通過 TCLP 限定值，則必須按照有害廢棄物方式掩埋。但美國並未強制規定飛灰與底灰分開收集，因而有大部分垃圾焚化爐經營者，對於重金屬含量較高的飛灰，為避免被認定為有害廢棄物而增加額外的處理費用，均將飛灰與含重金屬較低的底灰混合，以稀釋方法減少重金屬含量，而達到符合 TCLP 要求後，再送往單一掩埋場處理 [Eighmy, 1996]。

加拿大針對焚化灰渣的管理，依 1989 年加拿大環境公署制定的「垃圾焚化爐操作與排放準則」，為避免飛灰中高濃度重金屬污染底灰，因此規定底灰與飛灰採取分別收集處理。而底灰處置方式允許其掩埋於一般垃圾掩埋場，現今英屬哥倫比亞、安大略、魁北克各省皆採取此方式處置底灰。在飛灰方面，因屬於有害廢棄物，所以必需送至專用的有害廢棄物處置場，或經中間處理後才可棄置於一般掩埋場。

法國目前在飛灰處置方面，為使飛灰符合處置標準，目前為採飛灰水泥固化方式處理後再行掩埋，另飛灰玻璃化之熔融處理方法正進行中 [行政院環保署，2000]。

日本厚生省為加強焚化灰渣的管理，在1992年修正公告之「廢棄物處理法」，將飛灰列為「特別管理一般廢棄物」，規定飛灰必須經中間處理技術後方可掩埋，中間處理包括加酸萃取法、化學穩定法、水泥固化法、熔融燒結法等四種方法。底灰可直接或與經中間處理後的飛灰一起採用衛生掩埋。

(2) 再利用於建材及道路骨材

美國加州、紐約、佛羅裏達等州均有應用實例，包括利用底灰或混合灰於建築用混凝土磚、停車場底層材料、路基材、掩埋場覆土、人工漁礁、海岸侵蝕防護等應用，以及作為瀝青混凝土及葛特蘭水泥的骨材取代物 [Kosson, 1996； Wiles, 1996]。

法國1994年法國環境部所制定之法令規定，底灰以標準溶出程式方法測試，按其溶出程度將之分為三種等級，說明如表2-4：

底灰若應用於道路建造，在此法令中規定必須為低污染性材料，符合“V”級可利用類標準，方可使用於道路工程之路基材料，目前法國底灰再利用率可達45%。

表2-4 底灰之分類等級

等級	類別	說明
V (Valorization)	可利用類	此類底灰重金屬溶出量較低，可作為道路工程路基材料
M (Maturation)	成熟類	中等材質底灰，通常需經過處理或儲存12個月以上，使污染物溶出行為達到穩定狀態後，才可再利用
S (Storage/Landfill)	儲存/掩埋類	底灰重金屬溶出量較高，必須送至掩埋場處置

(3) 其他處理方式

日本的垃圾焚化爐數量為全世界之冠，焚化灰渣產量相對龐大及因掩埋場用地取得不易，故大力推動焚化灰渣減容及再利用技術。因為熔融燒結技術可使焚化灰渣之原體積大幅地減少，並產生安定無害的熔融熔渣，故近年來熔融燒結處理設施急速增加 [廖明村等，1998]。表2-5為國外底渣之再利用實例表。

表 2-5 國外底渣之再利用實例 [廖明村，2004]

國家	應用實例
荷蘭	<ul style="list-style-type: none"> ● 嘉蘭防風牆（堤防） ● 鹿特丹高速公路 ● 路基材料 ● 凝土地磚 ● 哈鐵運河堤岸（非主結構應用）
法國	<ul style="list-style-type: none"> ● 道路基底層 ● 土木工程
丹麥	<ul style="list-style-type: none"> ● 道路基底層 ● 停車場基底層 ● 凝土級配料 ● 掩埋覆土材
德國	<ul style="list-style-type: none"> ● 土壤改良劑 ● 隔音牆填充材 ● 道路基底層 ● 建材
美國	<ul style="list-style-type: none"> ● 道路基底層 ● 基礎回填料 ● 停車場鋪面 ● 掩埋覆土材

2.2.2 國內灰渣之處理方式

國內一般廢棄物經焚化處理後，依行政院環保署之規定，飛灰與底灰需分開儲存收集，並且飛灰應以固化或其他中間處理方法處理，固化物的單軸抗壓強度應大於 10 kg/cm^2 ，並符合「有害事業廢棄物認定標準」溶出試驗標準規範。而在 1998 年時，環保署提出飛灰之修正法規，飛灰由原先採行固化等方法處理，且固化物需符合抗壓及溶出規定之「管末處理」，改

為即使經「有害事業廢棄物認定標準」溶出試驗超出規定者，仍可考慮採資源再利用方法處理。

近年行政院推動「挑戰2008國家發展重點計畫」當中的產業高值化計畫 [行政院，2004]，有一子計畫就是有關於焚化灰渣之處理及再利用。當垃圾焚化廠全部完工後（30座），每日焚化處理垃圾量可達26,150 公噸，垃圾焚化處理率可達90%，當中每公噸垃圾焚化後，約產生20-25%之焚化灰渣，因此估計每日產生焚化灰渣約6,538公噸。在此子計畫中將於各縣（市）焚化廠規劃設置至少1座的底灰分選廠，而經篩選後的骨材，即可再利用。且依據行政院環保署規劃，預計於九十六年底前完成2座「飛灰熔融示範廠」之設置，設計容量預計每座每日可處理焚化飛灰40~80公噸。目前1座「飛灰熔融示範廠」之環境影響評估程序已辦理完成，屆時飛灰將以熔融法產生玻璃質熔渣，將可製成地磚、碎石等可再利用材料，以達資源永續利用之目標。

2.2.3 焚化灰渣之資源化技術與利用

焚化灰渣中主要成份為 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 及 Fe_2O_3 等，這些物質可作為窯業原料，亦可以陶瓷固化方式製造成紅磚與地磚，或使用熔融玻璃化方式製成骨材。主要的資源化方式有以下幾種：

(1) 陶瓷固化

將灰渣升溫至 1200°C 以上，予以陶瓷固化，製成人行道磚、輕質骨材等建材，同時也可抑制重金屬之溶出。燒結製程與窯業的製磚作業類似，底渣需先乾燥、磁選及破碎後再研磨，再混入其他成分（如黏土、黏著劑），最後加壓成型後送入窯爐燒成固化體，燒結溫度約在 800-1000°C。燒結成品主要應用於建材方面如磚瓦及透水磚等，也有以焦炭或污泥混合燒結，製成人工輕質骨材 [行政院環保署，1999]。林傑等[2003]將集塵灰、底灰及水泥以不同比例混合後，將試體以 800~1,100°C 並持溫 0.5~4.0 小時燒結，研究結果現顯示，試體經 1000°C 持溫 60 分鐘後所燒結的試體，抗壓強度已可達到法定道路基材之基準，且燒結後飛灰原始物性改變，形成大粒徑且緻密的燒結體。

(2) 熔融固化

將灰渣以 1350°C 以上之高溫作熔融處理，灰渣之體積將減少，呈玻璃化，堅硬緻密，重金屬無法溶出，可直接掩埋或將其資源化製成建材。而熔融處理的目的包括：將灰渣中未燃部份予以高溫燃燒達到減量目標，經由熔融使灰渣玻璃化，重金屬封存於其中不易溶出，同時將熔渣製成可再利用之材料，達到資源化的目標。近年來美國、日本、德國及義大利等國，均積極發展此種方法。

(3) 道路骨材

焚化灰渣中底渣經分選篩分後直接再利用或作成混凝土製品。焚化底渣先經由磁選回收鐵金屬，渦電流分選非鐵金屬，可將底渣佔重量約 20 %、體積約 50 %之金屬物分選回收，而所剩的矽酸渣再篩分，將其餘顆粒區分為 5 mm 以下、5.25 mm 及 25 mm 以上三種尺寸。小於 5 mm 的細顆粒因含重金屬濃度較高，不適合資源化再利用，可與飛灰混合處理處置；5.25 mm 的灰渣顆粒則可符合 CNS6298 C-20 級道路用碎石級配粒徑之標準，可應用於道路工程，做為基層或底層級配填充料；而大於 25 mm 的顆粒因所佔比例少可直接掩埋處置，或經壓碎後併入 5.25mm 的分類中 [經濟部，2003]。利用熔渣做為交通量較低之道路或人行道建築之底層材料，如法國、德國、丹麥及荷蘭等國。

(4) 其他

- a. 法國利用灰渣具有特殊過濾及吸附功能，來處理廢液，經測試每噸灰渣可處理約一噸之廢液。德國則將灰渣做為土壤改良劑、隔音牆填充料等用途。
- b. 反應灰中含有大量之石灰物質，因而可以部分取代煉鋼中所需生石灰用量及提供 Si、Mn 作為煉碳鋼之元素，並利用煉鋼時的高溫（1600°C）將反應灰中戴奧辛及有機物破壞分解 [楊金鍾，2004]。

- c. 將飛灰與水以一定比例混合以去除重金屬並溶解金屬氯化物，經脫水後濾餅再資源回收殘留之鈣系鹼性物質以作為除酸藥劑 [廖明村，2004]。
- d. 環保水泥又稱為都市垃圾焚化灰渣或下水污泥再生成資源再利用型水泥。其特點如下：焚化灰渣中的主成分為可作為水泥原料來源；環保水泥需應用於無鋼筋的領域（如消波塊、漁礁、道路的路基材料及混泥土磚等），主因是灰渣中氯會造成鋼筋的腐蝕；環保水泥中無戴奧辛的存在，其是因戴奧辛在水泥生產過程的高溫下(1350°C)會被分解[行政院環保署，1999]。
- e. 焚化灰渣添加鹼性溶液進行水合作用、過濾清洗、離子交換、乾燥等而製造人工沸石[楊金鍾等，2000]。

根據行政院國科會工程處環工學門簡訊第20期[2003]，綠色環境產業零廢棄技術研發為未來國科會環工學門重點研究主題。其中有關資源循環資材化前瞻性技術研究包括：調質熔融資材化關鍵技術、熔融製造骨材之技術開發與應用、廢棄物燒製生態水泥之研究、廢棄物燒結研製超輕質隔熱材、廢棄物電漿熔融資源化技術研發及污泥資材化之技術研究。由此可知，廢棄物電漿熔融資源化技術已經逐漸在國內受到重視。

2.3 電漿玻璃化處理技術

電漿(Plasma)乃為高度離子化的高溫氣體(Highly Ionized Gas)，但是因為它的一些性質與氣體截然不同，故有人稱之為物質的“第四態”(The Fourth State of Material)做為區分。通常將氣體離子化需要能量的供給才能產生而且它存在時的溫度相當高，故在一般情況下是無法看得見或保有電漿的存在。然而電漿在太空中即是最常見的物質之一，它在高溫的太陽表面上更是重要的組成物質。

電漿並不是新的技術，工業界已用了它好幾十年了，從最早應用的金屬與陶瓷的材料製造，鈦合金的冶煉，化學溶劑的製作，金屬與耐火材料的回收，高級金屬的精鍊，金屬切割與熔焊等皆是；近年來它更被用來取代傳統噴射引擎作為最先進戰鬥機的動力來源。這些商業應用証明了電漿是產生高溫且又潔淨的熱源。因為冷戰的結束以及美俄大量裁減核子武器的結果，使得世界各大國防工業公司（如洛克希德，奇異等）皆紛紛將高科技技術移轉為民間或環保用途，而其中之一，就是電漿技術的轉移。

近年來，國外的電漿處理技術應用在環保方面的研究及試轉已有令人非常滿意的結果。它是利用溫度高、易控制且無污染之虞的電漿作熱源，將欲處理之廢棄物予以加熱至攝氏 1400~1600 度，使之玻璃化，成為玻璃體之熔岩塊。因為所得的熔岩塊具有高度的化學穩定性，因此無論是有機或無機物質，亦或是重金屬皆能因高溫完全燃燒分解或是熔融合成在玻璃體中，其濾出率非常低，不需要另外再做二次處理就符合掩埋的

環保標準。因為它的處理溫度高且在密閉式的負壓狀態下作業，安全性高；加上處理時的氣氛可針對處理之對象作不同的選擇，如氧化狀態用於處理有機廢棄物等，因此，它處理的對象含蓋：液態、固態及氣態等多種物質，且毋需做前處理的嚴格分類工作，經濟效益遠比傳統焚化爐為高。利用高溫電漿熔融技術處理焚化灰渣，近年來已經漸漸的受到重視。其為利用燃燒或使用電氣加熱至灰渣的熔融溫度（約 1300°C ~ 1500°C），使得有機物瞬間熱解燃燒，無機物則形成熔渣，低沸點之金屬及鹽類則至排氣中收集。其他之重金屬則在熔融的過程中重新與灰渣中之二氧化矽鍵結，包封在矽酸鹽的網狀結構中，形成穩定的玻璃物質[鍾昫泰等人，1997]，經由 TCLP 檢測的結果均可符合限制的標準。

由於所得的熔渣具有高度的化學穩定性，因此無論是有機或無機物質，亦或是重金屬皆能因高溫完全燃燒分解或是熔融合成在玻璃體中，不需要另外再做二次處理即可符合掩埋的環保標準。因為它的處理溫度高且在密閉狀態下作業，加上處理時的氣氛可針對處理之對象作不同的選擇，經濟效益高。這些種種的優點使得以高溫熔融技術處理有害廢棄物，勢必將成為安全且符合環保要求的技術。其主要的特色為：減容效果佳、重金屬溶出率降低、熔融爐佔地面積小、熔渣可資源化再生利用。以高溫電漿熔融技術處理有害廢棄物的能源消耗較高，另外熔融所產生的熔渣能否有效的利用為其成功的關鍵。

2.4 熔渣資源化技術

泡沫玻璃是以玻璃為原料經高溫發泡成型具多孔封閉獨立氣泡之無機非金屬材料，其製造方法是依據玻璃軟化點與發泡劑產生氣體作用溫度互相配合下，使得內部氣泡相互獨立、封閉。泡沫玻璃具有防火、防水、耐腐蝕、不燃、防蛀、無毒、不老化、無放射性、機械強度佳、尺寸穩定性高等特點；可應用在各種化學工業的容器、管線的斷熱材料、建築物屋頂、冷藏庫的隔熱材、及救生艇、救生浮具等[呂學俊，1977]，在台灣相關研究並不多，僅在民國 60 年有初步的研究[侍慕揚，1971；呂學俊，1977]。因此，利用玻璃質熔渣製成泡沫玻璃可提供熔渣資源化之另一再生途徑。

2.4.1 泡沫玻璃

泡沫玻璃是一種以玻璃粉為主的原料，添加發泡劑經熔融發泡和退火冷卻加工處理，所得具有均勻孔隙結構的多孔輕質玻璃製品[姜繼聖等，2002]。玻璃粉在加熱軟化或熔融冷卻時，具有很高的黏度，若在此階段，體系內有氣體的產生，則會使黏流體發生膨脹，冷卻固化後，便形成微孔結構[徐惠忠等，2001]。且加熱系統中玻璃需要有足夠的黏度使得氣泡不會成長而逸散。若溫度太高，氣泡會成長且玻璃黏度下降就不能形成泡沫玻璃。因此在製作泡沫玻璃時，作業溫度必須高於玻璃之軟化溫度且低於熔

融溫度。

通常在製作泡沫玻璃時，除了可添加發泡劑之外亦可添加抑晶劑。因為在製作的過程中，過多的 CaO 及 MgO 可能會造成結晶的現象並增加其軟化點，所以必須添加抑晶劑以抑制結晶產生。但過多的抑晶劑卻可能會造成軟化點的降低，使得產品的強度也降低，最適當的添加比例大約在 3~7%。水玻璃、矽酸鈉、硼酸、硼砂及硫酸鈉都是常見的抑晶劑[Akaishi, 2002]。

在北歐地區使用泡沫玻璃當成建築材時，可能會發生結霜的問題。這是因為一般泡沫玻璃吸水率大約在 5~15%，所以會產生些許的結霜。因此，可在製作的過程中再添加防凍劑以防制結霜。過多的防凍劑也會造成結晶及增加軟化點，適當的添加比例則大約在 3~12%。矽礦石、石棉、輕質水泥及矽酸鈣都可當作防凍劑[Akaishi, 2002]。

2.4.2 泡沫玻璃的生產方法

泡沫玻璃的生產方法通常可以分為燒結法與熔製法二種。

(1) 燒結法

燒結法是目前最多泡沫玻璃製品生產方式，其生產原理是先將廢玻璃

磨成細粉，混入發泡劑和少量助熔劑，置於模具中，然後進行發泡。其生產流程如圖 2-1 所示。

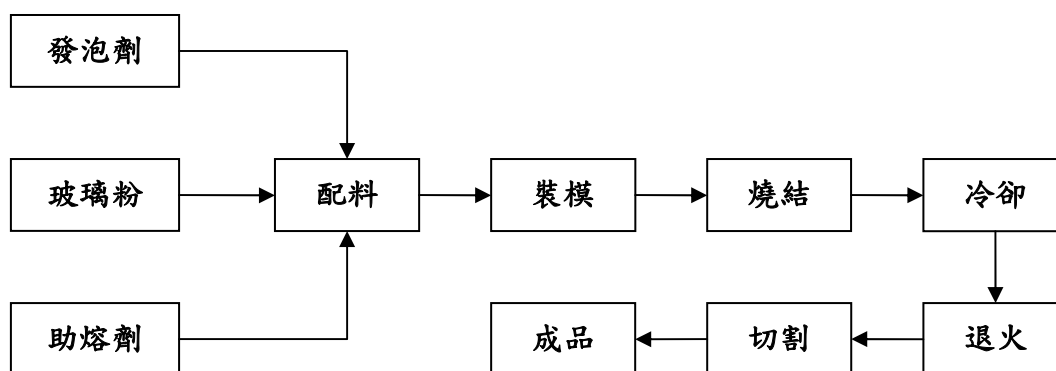


圖 2-1 生產流程圖

泡沫玻璃的燒成、冷卻與退火的過程包括預熱、燒結、發泡、冷卻、退火、再冷卻等完整的過程。

預熱的目的在於消除試體內外的溫度差，防止表層玻璃粉過早熔融，以便均勻的發泡。而在冷卻的過程中，玻璃體內會產生應力，為了消除內應力，需進行退火處理。

(2) 熔製法

熔製法是採用玻璃原料，經熔化、發泡、冷卻、退火而製成泡沫玻璃。此方法的優點是不受廢玻璃來源的限制。按照氣泡的形成方式，熔製法的

生產方法可以採用以下三種模式：

- a. 充氣法：將充滿玻璃熔漿的容器內打入壓縮空氣，並在玻璃上部施加壓力，使其不產生沸騰。上部氣體的壓力應保證當玻璃熔漿冷卻到玻璃轉變溫度時，氣孔內仍保留一個大氣壓，隨著溫度的降低壓力逐漸下降，將大量氣孔保留下來。
- b. 真空法：先將模具預熱到 400°C，然後將未澄清的玻璃熔漿倒入模具，冷卻到預定粘度時，抽成真空，促使玻璃內的氣泡生成、成長。
- c. 回火法：將含有發泡劑的玻璃粉加熱熔融，在未澄清的情況下迅速倒入模具，當溫度降至發泡溫度時，持溫 15~20min，使發泡劑充分發泡，然後迅速冷卻。

2.4.3 泡沫玻璃之物理性質

泡沫玻璃為一無機材料，具有完全不燃之性質且不會產生任何有毒氣體，可做為防火建材，其熱膨脹收縮率可達 9.0×10^{-6} /°C 為所有保溫材料中最低者，基本上接近水泥和鋼鐵的熱膨脹收縮率，此等良好的尺寸穩定性使其可成為最合適的水泥及彩鋼建築物的保溫和防水材料，另外還具有機

械強度高、尺寸穩定性好、保溫、隔熱、防水、防火及隔音等優異性質，其物理性質如表 2-6 所示。

表 2-6 泡沫玻璃之物理性質

項目	密度	熱膨脹係數	比熱	熱傳導	熱擴散	吸水率	抗壓強度	抗折強度
單位	kg/m ³	/°C	kcal/km.°C	Btu-in/hr · ft ² · °F	cm ² /Sec	% by volume	psi	psi
A	145	40×10 ⁻⁷	0.20	0.40	0.0043	0.03	140	100
B	145	83×10 ⁻⁷	0.20	0.35	0.0045	0.20	100	75
C	130	9×10 ⁻⁶	0.20	0.29	0.0043	0.20	100	80

[侍慕揚，1971；呂學俊，1977；市售之泡沫玻璃]

2.4.4 影響泡沫玻璃性能之因素

影響泡沫玻璃性質的因素有：配料比例、發泡劑的粒度、發泡溫度、升溫速率、發泡時間等。然而會影響泡沫玻璃的強度，主要取決於密度。在相同的密度條件下，其抗壓、抗折強度都優於其他絕熱材料，但其性脆，抗衝擊強度較低【徐惠忠，2001】。而氣孔大小與連通狀況，對於泡沫玻璃之絕熱性質影響較大。其中，氣孔大小與連通狀況主要是由於發泡劑種類、粒度、用量多寡及發泡時間長短等多種因素所影響。例如：碳酸鹽類的發泡劑，氣孔不容易穩定，易生成連通的孔隙；而碳黑和氧化物發泡劑，易形成封閉孔隙。在粒度方面，粒度越細，氣泡越小；加入的量越多，氣泡也越多。

泡沫玻璃的外觀缺陷主要是扭曲，裂紋和熔洞。產生扭曲的原因是因為在冷卻的過程中由於溫度分佈不均，各處收縮不一所造成的。為了克服這種缺陷，一是要求壓錠厚度不宜過厚，二是最好採用脫模退火，以免底部降溫緩慢，氣泡不穩定。裂紋主要是迅速降溫所造成，所以不應立即出窯，應緩慢冷卻，冷卻速度應小於等於 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。若樣品內產生熔洞，主要是因為發泡時間過長，或發泡後冷卻速度過慢，因此，必須掌握好發泡過程中之溫度控制。一般而言，發泡時間小於等於 30min，降溫時間大於等於 10min【徐惠忠等，2001】。

2.4.5 泡沫玻璃之應用

由於泡沫玻璃是一種防水、防火、耐腐蝕、不燃、防蛀、無毒、無放射性、機械強度好等特性之無機材料。所以其容易加工，低溫之斷熱效果良好，比水還輕，故可應用在各種化學工業的容器、管線的斷熱材料、建築屋頂、冷藏庫的保溫材、吸音工程及救生用具等。

2.5 發泡劑之種類與研究

發泡劑，是指在某特定溫度其物質因分解而會產生氣體（如：CO、CO₂等）。此氣體被包封在玻璃中形成泡沫玻璃之物質。發泡劑的種類有很多，例如：碳酸鹽類、硫酸鹽類、活性碳、碳化矽及矽膠等。表 2-7 為常用發泡劑種類與其作用溫度。

表 2-7 常用發泡劑種類與作用溫度【徐惠忠等，2001】

發泡劑	產生氣體原理	作用溫度 (°C)
黏土礦物	脫除結晶水	560~780
火山玻璃	脫除化學結合水	350~780
大理石	$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	750~950
白雲石	$\text{MgCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{MgSiO}_3 + \text{CO}_2$	700~750
	$\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2$	920
菱鐵礦	$\text{FeCO}_3 \rightarrow \text{FeO} + \text{CO}_2$	850~950
硫酸鈉	$\text{Na}_2\text{SO}_4 + 4\text{C} \rightarrow \text{Na}_2\text{S} + 4\text{CO}$	850
碳黑	$2\text{C} + \text{SO}_3 \rightarrow \text{S}^{2-} + \text{CO} + \text{CO}_2$	500~850
赤鐵礦	$4\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C} \rightarrow 8\text{FeO} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$	1000~1350
軟錳礦	$4\text{MnO}_2 + \text{C} \rightarrow 4\text{MnO} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$	1000~1200
碳化矽	$\text{SiC} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{CO}_2$	800~1400
活性碳	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	750~850
矽膠	—	980~1300
白雲母	脫水膨脹	850~890
黑雲母	脫水收縮	1075~1150

1. 碳酸鹽類

碳酸鹽類被用來當作發泡劑時，在分解過程中會產生 CO 或 CO₂，通常其反應劇烈所以可以很成功地製作成泡沫玻璃，此時所添加的比例大約在 0.3~10%。

2. 大理石

大理石在 750°C~950°C 間會分解釋放氣體產生 CO₂。

3. 白雲石

白雲石分解的溫度有兩段，第一段在 700~750°C，屬於 MgCO₃ 之分解，而在 920°C 時屬於 CaCO₃ 分解。

4. 硫酸鹽類

硫酸鹽類在加熱的過程中，會釋放 SO₂。如：硫酸鈉在 850°C 時會產生些微的 SO₂ 氣體；若與氧化鐵混合，可降低分解溫度，約在 700°C 產生大量的氣體。硫酸鈉之反應式為： $Na_2SO_4 + 4C = Na_2S + 4CO$ 。

5. 活性碳

活性碳適當的分解溫度在 700°C~850°C，更佳的溫度則是在大約 750°C~800°C 之間。均勻混合後，活性碳粉末中若缺乏足夠的氧氣能夠產

生作用並釋放氣體，此時須加入氧化劑，如：高錳酸鉀、碘酸鉀、硝酸鈉等。

6. 碳化矽

碳化矽 (SiC) 是一種商業上最常使用之發泡劑，在生產的過程中須與 SO_3 均勻混合即產生 CO_2 和 S。

7. 矽膠

在使用矽膠為發泡劑時，須將矽膠曝露在濕氣中以吸收水分再使用。這是根據 sol-gel 方法，使得矽膠產生水解作用，其作用溫度約在 980~1300°C 之間。

2.6 廢棄物資源化製成泡沫玻璃之相關研究

熔融的液相物質在快速冷卻之下，內部原子來不及做規則排列，如此便形成玻璃態，而焚化灰渣組成成分具有產生玻璃之有利條件，其主要組成為 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 及 MgO 等，這些化學成份適合作為製造玻璃所需之玻璃形成劑、網狀修飾劑及中間氧化物等成份。因此運用高溫熔融技術處理此等廢棄物時，會促使熔渣進行玻璃化作用產生玻璃質熔渣，再添加適當的發泡劑、助熔劑及發泡穩定劑等添加物，將玻璃質熔渣進行適當的發泡熱處理過程，便可得性質優異之「泡沫玻璃」。

郭兵等[2004]是以廢平板玻璃和瓶罐玻璃為原料，經高溫發泡成型的多孔無機非金屬材料。其內部氣泡相互獨立、封閉，密度為 $135\sim 200\text{Kg/m}^3$ ，導熱係數小於 0.060 W/mK 。泡沫玻璃具有防火、防水、耐腐蝕、不燃、防齧、防蛀、無毒、不老化、無放射性、機械強度佳及尺寸穩定性好等特點，它是環保型隔熱保溫材料。

方榮利等[2003]以煤灰和碎玻璃為主要原料，石灰石為發泡劑，磷酸鈉或硼酸為穩定劑。最佳原料配比粉煤灰：碎玻璃：石灰石：磷酸鈉 = $35:53.5:10:1.5$ ，粒度控制在 0.08 mm ，成形壓力在 $3\sim 5\text{MPa}$ ，以 $10\sim 20^\circ\text{C}/\text{min}$ 速率升溫至 850°C 持溫 60min ，再升溫至 950°C 持溫 60min ，可獲得性能較

佳的泡沫玻璃。此體密度為 $468\sim 479\text{ kg/m}^3$ ，抗壓強度為 $3.3\sim 3.5\text{MPa}$ ，導熱係數為 $0.091\sim 0.094\text{W/mK}$ ，吸聲係數則為 0.3 。以粉煤灰和碎玻璃為原料生產泡沫玻璃，為粉煤灰及碎玻璃資源化再利用開闢了新途徑，具有顯著的社會經濟效益。

方榮利等[2003]試驗用主要原料為粉煤灰渣、廢玻璃、石灰石、工業碳酸鈉為發泡劑，燒成條件以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 升溫至 850°C 持溫 1 小時，再升溫至 950°C 持溫 1 小時，以石灰石為發泡劑可獲得密度 0.474g/cm^3 ，導熱係數 0.093W/mK 之泡沫玻璃，以工業碳酸鈉為發泡劑可獲得密度 0.486g/cm^3 ，導熱係數 0.096W/mK 之泡沫玻璃。

田英良等[2003]以廢顯像管為主要原料，以碳黑為發泡劑，再添加硼砂作為助熔劑，增加玻璃的表面張力，改善泡孔結構，以提高泡沫玻璃之性質。以廢顯像管生產泡沫玻璃的最佳配方為：管屏 65 wt%，管錐 35 wt%，碳黑 0.4wt%、硼砂 2.0 wt%。玻璃粉粒度大於 150mesh，碳黑 200 mesh，硼砂 200 mesh。利用廢顯像管玻璃生產泡沫玻璃，可以有效解決顯像管資源化問題，同時具有環保效益。

李廣申等[2002]利用廢玻璃和高爐爐渣為基礎原料，添加碳酸鈉為發泡劑。其中高爐爐渣在高溫時可釋放 SO_2 ，亦可作為發泡劑，並可降低玻璃熔體的表面張力。添加高爐爐渣比純玻璃粉製作泡沫玻璃較易發泡，且燒

成溫度較低。溫度在 800~900°C 都可製作出性能較好的泡沫玻璃，以添加比例為 10% 較佳。泡沫玻璃的抗壓強度與比重成正比，可表示為： $\sigma = -0.06 + 7.45\rho$ 。

範征宇等[2002]採用高溫燒成，研究發泡劑添加量、原料細度、燒成溫度等對泡沫玻璃性能的影響。發泡劑採用工業純芒硝，促進劑為 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 和 Sb_2O_3 ，發泡劑添加量為 2.0%~4.0%，燒成溫度為 1150°C，鈣渣通過 180mesh，可以製得開孔率大於 40%，表密度 220~310kg/m³、抗壓強度 2.5~3.4MPa 的淡黃色開孔型泡沫玻璃。可知體積開孔率 P 與表密度有關，為泡沫玻璃的主要參數，泡沫玻璃孔開孔率反應泡孔連通情況，與表密度無關。

趙秀梅[2002]用廢舊玻璃生泡沫玻璃，不僅節約了大量礦物資源，而且解決了因廢舊玻璃的堆積造成的污染，碳粉作為發泡劑，發泡劑用量 5%~10%，燒成溫度 850°C，退火溫度 500°C~550°C，以消除冷卻過程中產生的殘餘應力，用廢舊玻璃生產泡沫玻璃、不僅成本低、質量好、生產工藝簡單，而且產品用途廣泛。

李月明等[2000]採用廢平板玻璃和廢瓶罐玻璃為主要原料，以木炭粉、煤粉、焦炭為發泡劑，再添加硝酸鈉、氧化鐵、硼砂及氟矽酸鈉為助熔劑。其燒成過程先低溫預熱以 5°C/min 升溫至 300°C，再以 10°C/min 升溫至

680°C，最後發泡溫度為 20°C/min 升溫至 810°C 持溫 30min，而後快速冷卻至 580°C 持溫 30min，緩慢冷卻至室溫，這種低溫發泡條件可節省能源，降低成本。泡沫玻璃比重為 0.3g/cm³，抗壓強度為 1.0MPa，導熱係數 0.2(212°C)W/mK，而熱膨脹係數為 8.6×10⁻⁶/°C。

陳建華[2000]以廢玻璃纖維硬絲為主要原料，並對外加劑和燒成制度對泡沫玻璃性能的影響進行了分析討論，穩泡劑 A 和 B 採用化學純試劑，最佳用量 2%；結合劑水玻璃為工業品。發泡劑：焦炭用量 1.5%純鹼用量 2.5%，燒成溫度 850°C，可以製出體積密度小、抗壓强度高、導熱係數低的泡沫玻璃。

綜合上述所論，大部分泡沫玻璃的起始原料均為成分單純的玻璃，其雜質較少，且大部分泡沫玻璃成分均屬於SiO₂-Al₂O₃-CaO系列，必須添加適合的發泡劑、助熔劑等添加物，發泡過程所需之燒成溫度約在800°C～1000°C之間，產生的泡沫玻璃材料比重小，並具有低熱傳導率及低熱膨脹率等優異性質。本研究是以焚化灰渣電漿熔融後所得的水淬熔渣為起始原料，其成分及雜質較複雜，而且熔渣軟化溫度往往受到組成成分之影響，因此以焚化灰渣電漿熔融後所得的水淬熔渣製成的泡沫玻璃材料需添加適當之發泡劑及助熔劑，並在特定之熱處理條件下進行發泡過程，方能產生性質優異之泡沫玻璃。

第三章 研究方法及步驟

3.1 實驗材料

3.1.1 水淬熔渣

本研究所使用焚化灰渣為台灣北部某大型都市垃圾焚化爐之反應灰、集塵灰及底灰，產生的水淬熔渣係由核能研究所將焚化爐集塵灰、反應灰或底灰依照一定的比例混合後，經核能研究所非放射性先導型電漿焚化熔融爐（圖 3-1）高溫熔融後，再經過水淬產生之玻璃質熔渣，外觀如圖 3-2 所示，實驗所使用之水淬熔渣原料共分以下二種：

- (1) 底灰：飛灰=1：1（簡稱 11 熔渣）。
- (2) 反應灰：集塵灰=1：3（簡稱 13 熔渣）。



圖 3-1 核能研究所非放射性先導型電漿焚化熔融爐外觀照片



圖 3-2 水淬熔渣之外觀照片

3.1.2 發泡劑

碳酸鈣、碳酸鈉、碳酸鎂、碳黑、白雲石、硫酸鈉、硝酸鉀、硼酸、硼砂、碳化矽、氧化矽、水玻璃、石墨粉+硝酸氨、純鹼 (Na_2O_3)、方解石、大理石、硫酸鈉、活性碳、矽膠、硫酸鈣+碳酸鈣、氧化鐵、鋁粉及金剛砂等。上述發泡劑經由實驗測試及參考相關文獻發現，添加白雲石及硫酸鈉為發泡劑時發泡效果最好，因此本研究選定白雲石及硫酸鈉為發泡劑。

3.1.3 助熔劑

NaSiO_2 、長石、方解石、鐵紅（鐵鏽、鐵磷）、純鹼 (NaCO_3)、水玻璃

3.1.4 發泡穩定劑

磷酸鈉。

3.1.5 其他

- (1) 抑晶劑：硼砂、硼酸
- (2) 析晶劑：矽灰石
- (3) 表面活性劑：五氧化二釩、氫氧化鉀、矽酸鈉

3.2 實驗設備及測試與分析方法

3.2.1 可程式控制高溫電爐

本研究所使用之燒結儀器為英製可程式控制高溫電爐(Carbolite，RHF1600)。具有 32 段程式設定，可精準控制實驗過程中的升溫速率、持溫時間及降溫速率等，實驗設備如圖 3-3 所示。



圖 3-3 可程式高溫電爐設備圖

3.2.2 熱差/質差分析

將小於 200mesh 的熔渣粉末與發泡劑分別以熱差/質差分析儀測試，所得之 DTA 曲線圖可以瞭解樣品在加熱過程中的反應。本研究所使用之 DTA

為法國製之 SETARAMSETSYS 16/18A 熱差/質差分析儀。測試設備如圖 3-4 所示。



圖 3-4 熱差/質差分析設備圖

3.2.3 物理性質試驗

以阿基米德原理測定試體之體密度、視比重及吸水率【賴耿陽，1990】。實驗方法是將試體泡在水中 2 小時，測量試體之浮重 $W_1(g)$ 、飽和重 $W_2(g)$ 及乾燥重 $W_3(g)$ 。實驗所得結果代入公式(3-1)至(3-3)，計算可得試體之體密度、視比重及吸水率。

$$\text{體密度} = \frac{W_3}{(W_2 - W_1)} \quad (3-1)$$

$$\text{視比重} = \frac{W_3}{(W_3 - W_1)} \quad (3-2)$$

$$\text{吸水率} = \frac{(W_2 - W_3)}{W_3} \quad (3-3)$$

3.2.4 抗壓強度試驗

將試體磨製成立方體，置於萬能試驗機(Shimadzu UEH3-0)台板中央，上下兩面放置厚紙板一張，以平均壓力消除表面不平整之誤差。啟動試驗機，恆速施加壓力，直至試體破壞。記錄破壞試體之荷重，代入式(3-4)計算抗壓強度。

$$P = \frac{W}{A} \quad (3-4)$$

式中 W—破裂荷重(kgf)

A—受壓力的截面積(cm²)

3.2.5 熱傳導試驗

將試體表面研磨平整，以 Hot Disk 熱導係數儀(瑞典 Hot Disk AB)測量熱傳導。測量時，探頭被放置於兩片樣品中間，電流通過探頭時，產生一定的溫度上升，產生的熱量同時向探頭兩側的樣品進行擴散，熱擴散的速度依賴材料的熱傳導特性和探頭的尺寸，通過記錄溫度與探頭的回應時

間，材料的熱傳導特性可以被計算出來，測試設備如圖 3-5 所示。



圖 3-5 熱傳導試驗設備圖

3.4 實驗流程

本研究實驗流程先進行原料性質分析，再將水淬熔渣破碎研磨至所需粒徑，添加不同發泡劑，施以發泡熱處理產生泡沫玻璃，最後進行材料性質分析試驗。本研究泡沫玻璃製程可分為 60mesh 白雲石發泡製程、100mesh 白雲石發泡製程及硫酸鈉發泡製程。

3.4.1 原料之性質分析

原料之性質分析流程如圖 3-7 所示，是將取得之水淬熔渣樣品置於烘箱內以 $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 乾燥至恆重，以篩子過篩方式瞭解樣品粒徑大小之分佈，ICP 測定樣品內所含之元素及氧化物，另外以 XRD 進行成份分析及晶相鑑定，最後以 DTA 來測定樣品之軟化點、熔點及熔流點之溫度。

3.4.2 60mesh 白雲石發泡製程

本研究 60mesh 白雲石發泡製程如圖 3-7 (b) 所示，是以 13 熔渣作為主要原料，將 13 溶渣經過旋錘碎礦機破碎，再加以研磨至 200mesh 以下，加入 60mesh 白雲石作為發泡劑，以水玻璃為助熔劑，均勻混合後置入模型中，再放入高溫爐進行發泡熱處理，熱處理條件是以 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升溫至 600°C 並持溫 30min，再以 $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升溫至 $880^{\circ}\text{C}\sim 960^{\circ}\text{C}$ 溫度持溫 30min 進行發

泡處理，最後於爐內冷卻至室溫產生 60mesh 白雲石製程泡沫玻璃。所產生之泡沫玻璃須進行修整切割，以便後續的性質測試，包括：體密度、視比重、吸水率、抗壓強度...等。

3.4.2 100mesh 白雲石發泡製程

100mesh 白雲石發泡製程如圖 3-7 (c) 所示，是將 13 溶渣經過破碎研磨至 200mesh 以下，加入 100mesh 白雲石作為發泡劑，以水玻璃為助熔劑，均勻混合後置入模型中，再放入高溫爐進行發泡熱處理，熱處理條件是以 10°C/min 升溫至 600°C 並持溫 30min，再以 20°C/min 升溫至 880°C ~ 960°C 溫度持溫 30min 進行發泡處理，最後於爐內冷卻至室溫產生 100mesh 白雲石製程泡沫玻璃。

3.4.3 硫酸鈉發泡製程

本研究硫酸鈉泡沫玻璃製程如圖 3-7 (a) 所示，是以 11 溶渣作為主要原料，將 11 溶渣破碎研磨至 200mesh 以下，加入不同比例之硫酸鈉作為發泡劑，並添加一定比例之硼酸、碳酸鈉及水玻璃為助熔劑，磷酸鈉為發泡穩定劑，均勻混合後置入模型中，再放入高溫爐進行發泡熱處理，熱處理條件是以 5°C/min 升溫至 100°C 並持溫 20min，再以 20°C/min 升溫至 780°C ~ 920°C 溫度持溫 30min 進行發泡處理，最後於爐內冷卻至室溫產生泡沫玻

璃。所產生之泡沫玻璃再加以切割拋光處理，以便後續的性質測試。

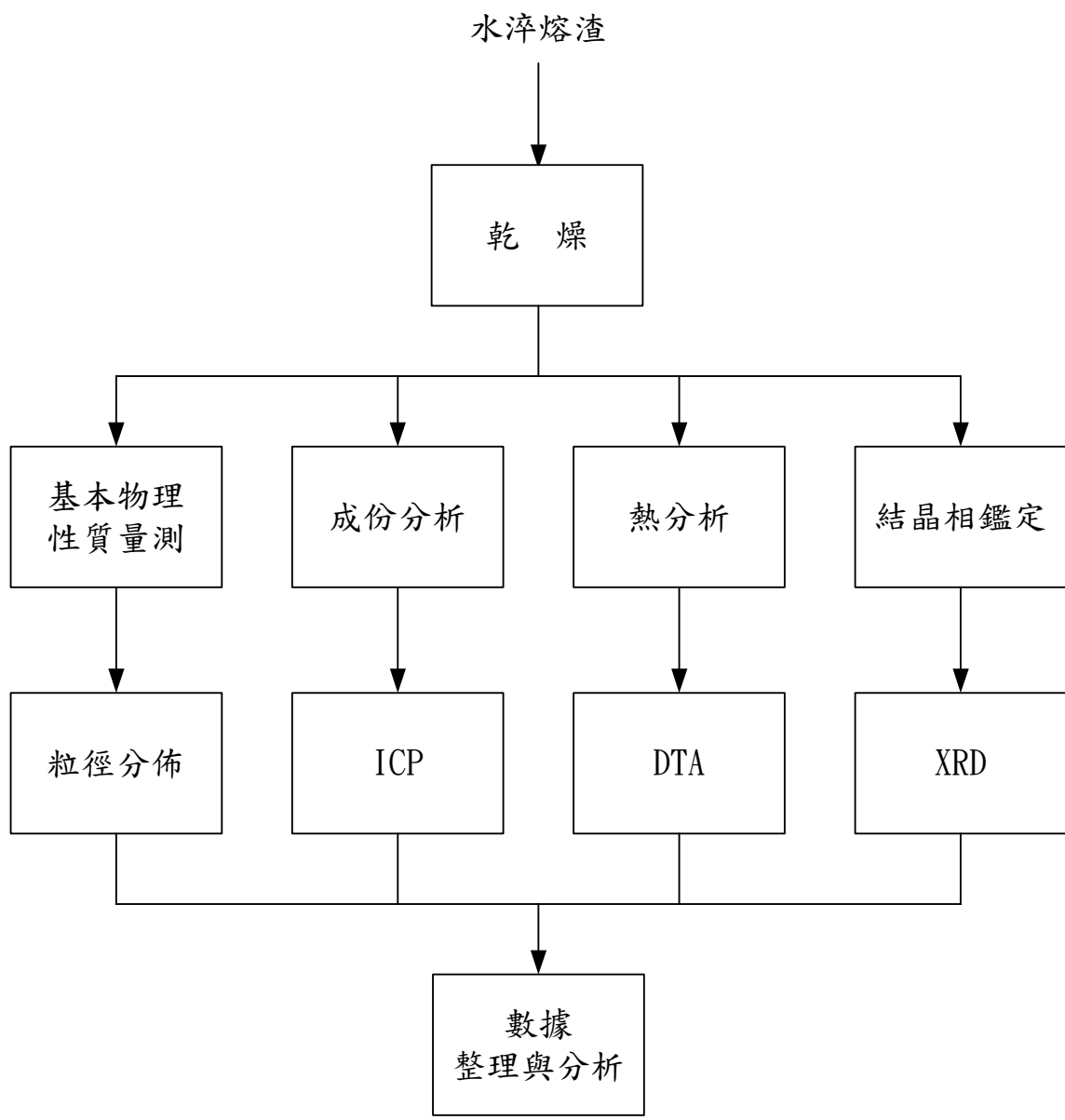


圖 3-6 原料之性質分析流程圖

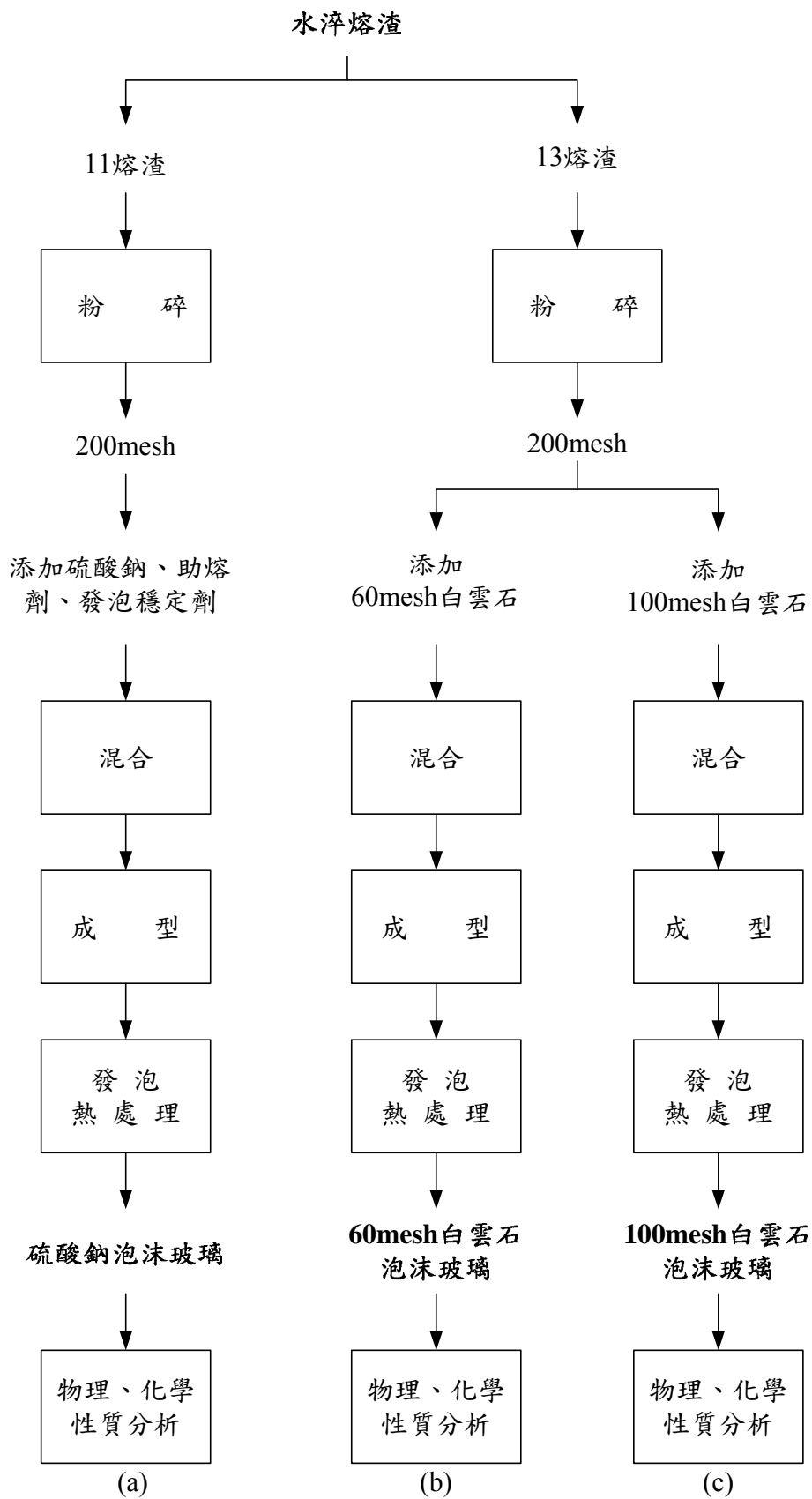


圖 3-7 實驗流程圖

第四章 實驗結果

4.1 水淬熔渣之性質分析結果

4.1.1 基本物理性質

本研究焚化灰渣依不同配比混合後，經大型電漿爐熔融水淬後之熔渣基本性質如表 4-1 所示。經實驗分析後之結果 13 熔渣及 11 熔渣，其體密度在 $2.97 \text{ g/cm}^3 \sim 2.95 \text{ g/cm}^3$ 之間，視比重為 2.99，孔隙率在 1.05%~1.46% 之間，吸水率在 0.37%~0.50% 之間，顯示水淬熔渣高密度及高比重，產生孔隙率小，吸水率低，而且不同配比的焚化灰渣熔融後之熔渣，基本物理性質相差不大。

表 4-1 熔渣之基本性質

性質 \ 熔渣	13 熔渣	11 熔渣
體密度 (g/cm^3)	2.97	2.95
視比重	2.99	2.99
孔隙率 (%)	1.05	1.46
吸水率 (%)	0.37	0.50

4.1.2 熔渣之粒徑分析

焚化灰渣經大型電漿爐熔融後水淬之熔渣粒徑分佈如圖 4-1 所示，粒徑分佈在 0.4mm~18 mm 之間，其中 D_{50} 為 3 mm， D_{90} 為 9mm。

圖 4-2 為其外觀圖，熔渣外觀呈現黑色不規則顆粒狀，表面具有玻璃光澤。

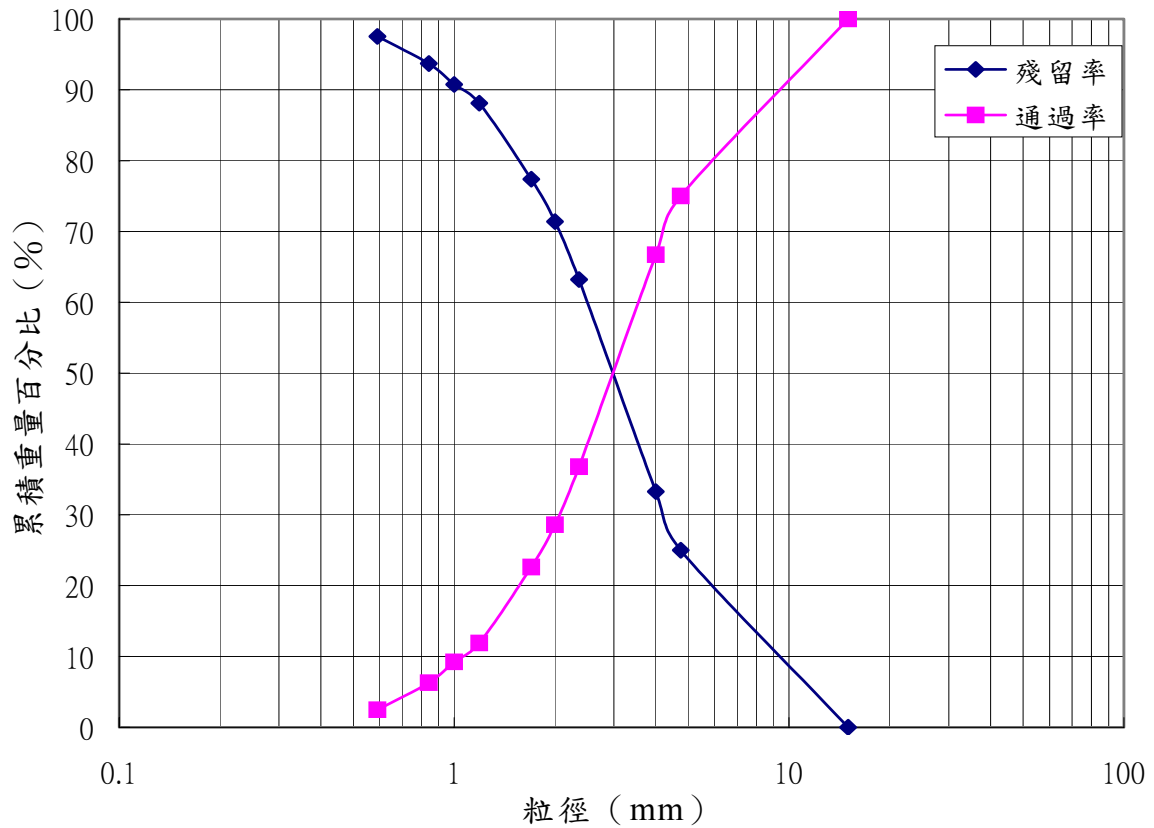


圖 4-1 水淬熔渣之粒徑分佈圖



圖 4-2 水淬熔渣之外觀照片

將 13 熔渣及 11 熔渣分別經旋錘碎礦機破碎後研磨至 200 mesh (約 $74\mu\text{m}$) 以下，其粒徑分佈如圖 4-3 及圖 4-4 所示，13 熔渣粉末之 D_{50} 為 $32.08\mu\text{m}$ ， D_{90} 為 $75.01\mu\text{m}$ 。11 熔渣粒徑分佈在 $0.4\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$ 之間， D_{50} 為 $28.74\mu\text{m}$ ， D_{90} 為 $64.49\mu\text{m}$ 。

經研磨至 200 mesh 以下之 13 熔渣及 11 熔渣粉末為製造泡沫玻璃之起始原料，為減少實驗過程所造成之誤差，於實驗前將原料大量粉碎研磨至所需粒徑後，分別予以封存備用。

經研磨至 200mesh 以下之熔渣粉末其外觀如圖 4-5 所示，熔渣呈現深灰色均勻細粉狀，表面無光澤產生，容易吸收水氣而潮解並產生團聚現象，

因此熔渣粉末之儲存應予以密封或於實驗前先烘乾處理。

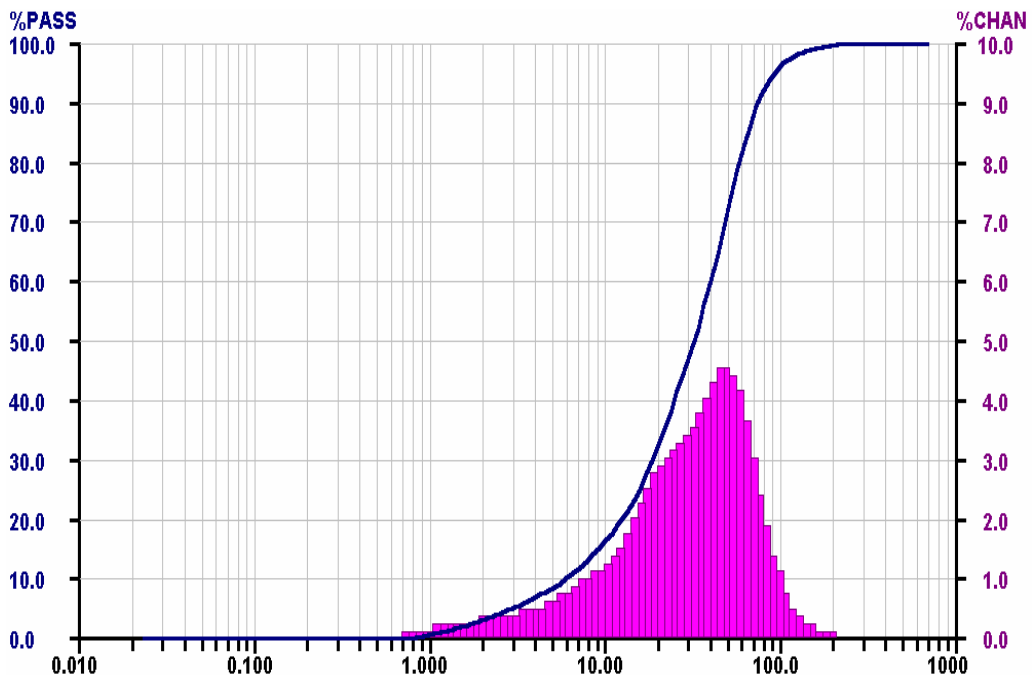


圖 4-3 13 熔渣研磨至 200 mesh 之粒徑分佈圖

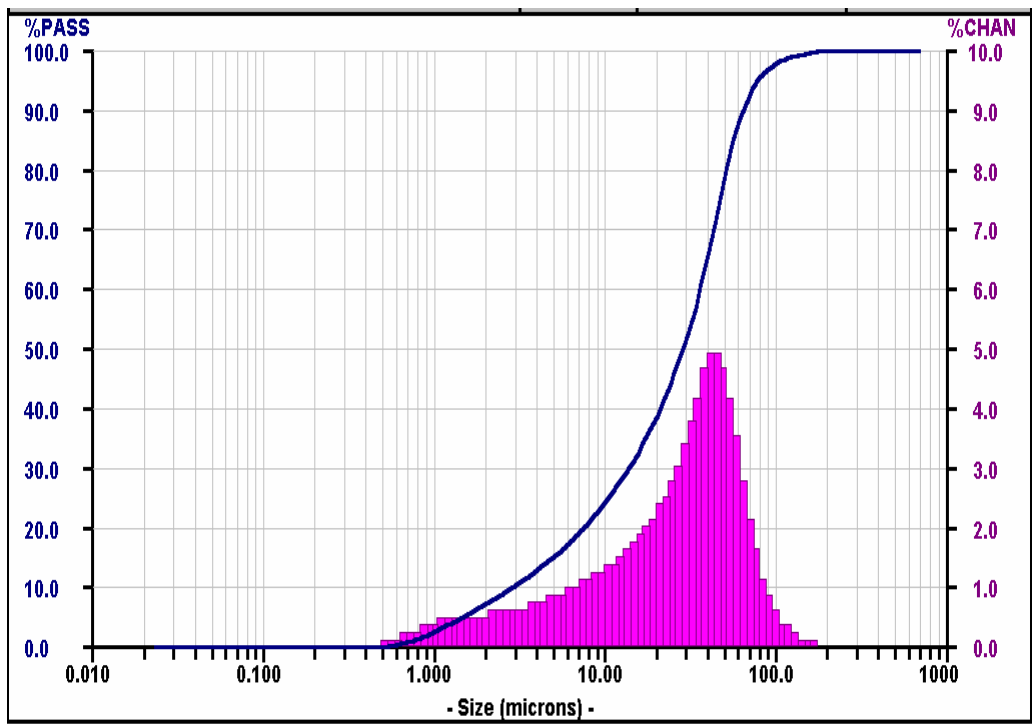


圖 4-4 11 熔渣研磨至 200 mesh 之粒徑分佈圖



圖 4-5 熔渣研磨至 200 mesh 之外觀照片

4.1.3 水淬熔渣之 X 光繞射分析

熔渣之 X 光繞射分析結果如圖 4-6 及圖 4-7 所示，經分析結果 13 熔渣及 11 熔渣所產生之 X 光繞射圖皆呈現非晶相之結果，這是由於焚化灰渣經高溫熔融處理後，成分中揮發性物質或部分重金屬成分揮發，其餘氧化物成分於高溫時熔融液化並均勻混合，經水淬方式急速冷卻，產生玻璃化之現象並將部分未揮發之重金屬封存於玻璃質之網狀結構中，所以顯現出非晶質構造。

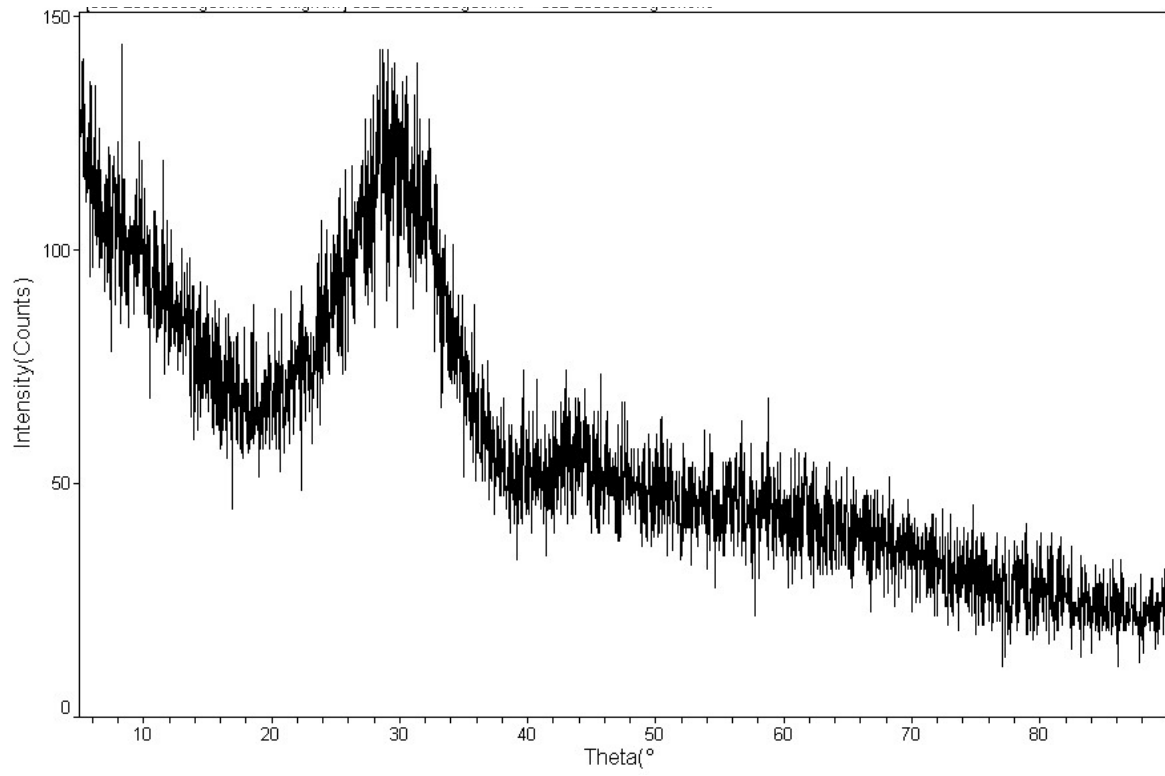


圖 4-6 13 熔渣之 X 光繞射分析圖

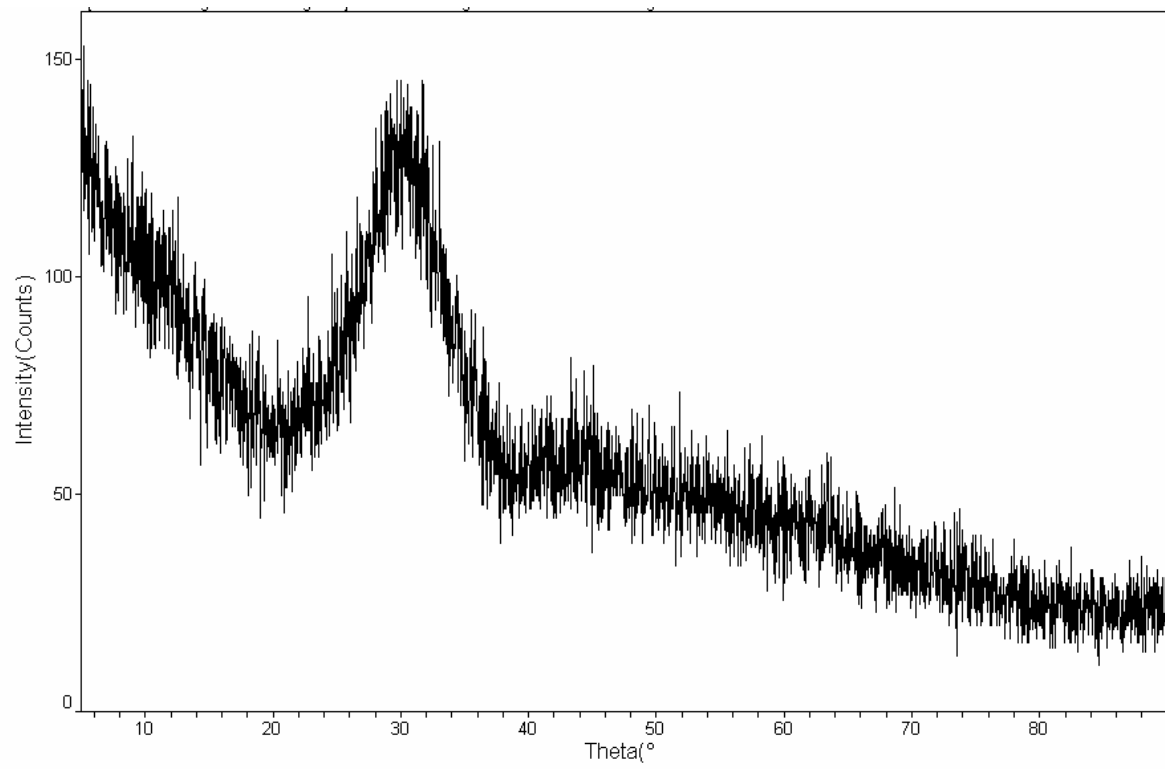


圖 4-7 11 熔渣之 X 光繞射分析圖

4.1.4 水淬熔渣之化學成分分析

各種焚化灰渣之水淬熔渣及廢平板玻璃之組成成份分析結果如表 4-2 所示，由實驗結果顯示，13 熔渣、11 熔渣及底灰熔渣之主要成份為 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 及 Fe_2O_3 等成分所組成。而一般廢平板玻璃成分主要是以 SiO_2 為主，經前人研究結果顯示，含有 SiO_2 、 Al_2O_3 及 CaO 成份之熔渣於 $850^\circ\text{C} \sim 950^\circ\text{C}$ 溫度予以熱處理時，容易產生如鈣鋁黃長石、矽灰石或透輝石等結晶相，此時若產生之結晶相結晶顆粒完整、顆粒小且大小均勻，將有助於提升材料之各項機械性質及耐酸鹼等性質。

4.1.5 熱差分析結果

13 熔渣以每分鐘 10 度之升溫速率升溫至 1550°C 之熱差分析結果如圖 4-8 所示，熱差分析實驗結果有助於判定熔渣資源化處理的條件，由分析結果可知，13 熔渣於 913°C 及 950°C 各有一放熱峰，顯示成核及晶體成長之溫度，且在 1225°C 及 1243°C 時產生吸熱峰，表示玻璃質熔渣開始熔融。

而 11 熔渣之熱差分析結果如圖 4-9 所示，實驗結果顯示，11 熔渣於 940°C 及 1067°C 各有一放熱峰，此為成核及晶體成長之溫度，而在 1208°C 及 1265°C 時各有一個吸熱峰，應為熔渣之熔融溫度。

經熱差分析結果顯示，13 熔渣及 11 熔渣玻璃熔融溫度約為 1200°C ~ 1250°C 之間，玻璃軟化溫度約低於熔融溫度 50°C ~ 100°C 左右，所以熔渣之軟化溫度約為 1150°C ~ 1200°C，由於泡沫玻璃之熱處理溫度需接近玻璃軟化溫度，因此，為降低熔渣之軟化溫度並配合發泡劑之發泡溫度，實驗原料中需加入水玻璃作為助熔劑，以降低熔渣之軟化溫度，因此實驗以 780°C ~ 960°C 作為泡沫玻璃之熱處理溫度。

表 4-2 各類玻璃質熔渣及廢玻璃之化學分析表

成分(wt%)	13 熔渣	11 熔渣	廢平板玻璃	底灰熔渣
SiO₂	33.19	39.27	58.40	45.09
Al₂O₃	16.09	13.40	0.85	14.23
CaO	30.54	10.80	2.40	15.88
Fe₂O₃	9.46	6.98	0.54	12.36
MgO	2.70	1.83	0.76	1.66
Na₂O	0.37	0.44	0.54	3.37
K₂O	0.15	0.10	0.52	0.64
TiO₂	1.97	0.54	N.D.	0.90
Cr₂O₃	N.D.	0.77	0.10	0.05
MnO₂	N.D.	0.11	N.D.	N.D.
ZnO	0.42	0.30	0.03	0.69
PbO	<0.01	N.D.	N.D.	0.10
NiO	0.08	0.01	N.D.	N.D.
CoO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
CuO	N.D.	0.12	N.D.	N.D.
CdO	0.03	<0.01	N.D.	N.D.

*N.D.表示未檢測出

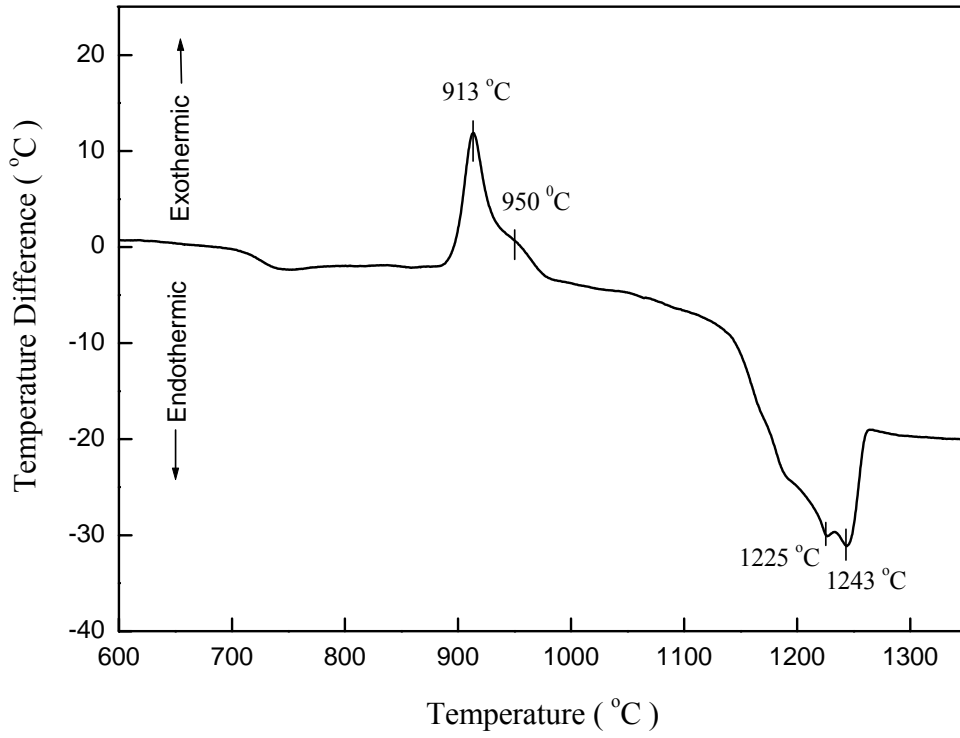


圖 4-8 13 熔渣之熱差分析曲線

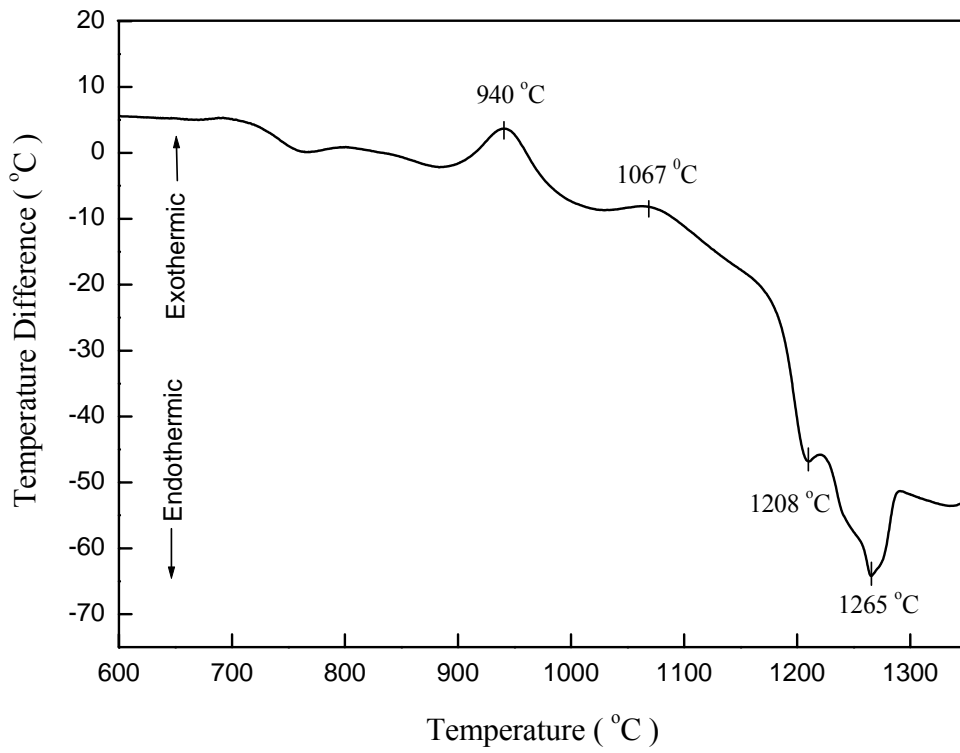


圖 4-9 11 熔渣之熱差分析曲線

4.2 白雲石發泡製程發泡溫度對泡沫玻璃性質之影響

4.2.1 發泡溫度對泡沫玻璃基本物理性質之影響










本研究 60mesh 白雲石製程泡沫玻璃是以 13 熔渣作為主要原料，加入 60mesh 白雲石作為發泡劑，以水玻璃為助熔劑，均勻混合後放入高溫爐進行發泡熱處理，熱處理條件是以 10°C/min 升溫至 600°C 並持溫 30min，再以 20°C/min 升溫至 880°C~960°C 溫度持溫 30min 進行發泡處理，最後於爐內冷卻至室溫產生泡沫玻璃。

白雲石製程泡沫玻璃基本性質分析及發泡情形如表 4-3 所示，當發泡溫度為 880°C 時，體密度為 1.2~2.0g/cm³，視比重為 2.24~2.31，孔隙率為 10%~50% 之間，吸水率在 6%~21% 之間，於不同發泡劑添加量時，視比重相差不大（如圖 4-11），體密度隨添加量由 5% 增加至 7% 時大幅降低（如圖 4-10），孔隙率與吸水率有相同變化情形（如圖 4-12 及圖 4-13），隨發泡劑添加量由 5% 增加至 7% 時孔隙率及吸水率大幅升高，於 7% 及 9% 發泡劑，泡沫玻璃之孔隙率及吸水率變化則不大。當發泡溫度升高至 920°C 及 960°C 時，不同發泡劑添加量所製成泡沫玻璃之體密度、視比重、孔隙率及吸水率則相差不大。

整體而言，當 60mesh 白雲石製程發泡劑添加量相同時，泡沫玻璃之比

重會隨著溫度升高而增加，這是由於隨發泡溫度增高，熔渣熔流性增加，而發泡劑分解速度加快，因此氣體快速產生並逸散，而導致其孔隙率降低體密度增大。此外於相同熱處理溫度，添加不同比例之發泡劑，對比重並無多大影響。在吸水率方面，其數值皆小於30%，顯示泡沫玻璃之孔洞無連通孔情形。因此，60mesh 白雲石泡沫玻璃最佳發泡劑添加量為7%~9%，熱處理溫度880°C~960°C則對泡沫玻璃性質影響不大，經實驗顯示整體白雲石泡沫玻璃所產生之孔洞較小且大小較為均勻，然而整體發泡量較少，比重較大，無法有效表現出泡沫玻璃之優良性質。

表 4-3 白雲石添加比例與發泡溫度對泡沫玻璃性質之影響

發泡劑	發泡溫度	添加量 (%)	體密度 (cm ³ /g)	視比重	孔隙率 (%)	吸水率 (%)	圖片
白雲石	880°C	5%	2.01	2.31	13.10	6.12	
		7%	1.27	2.36	46.00	26.55	
		9%	1.41	2.24	37.16	20.89	
	920°C	5%	1.38	2.37	41.52	23.07	
		7%	1.23	2.41	48.98	28.50	
		9%	1.28	2.37	46.00	26.43	
	960°C	5%	1.27	2.45	48.06	27.39	
		7%	1.37	2.41	43.41	24.13	
		9%	1.32	2.50	47.43	26.48	

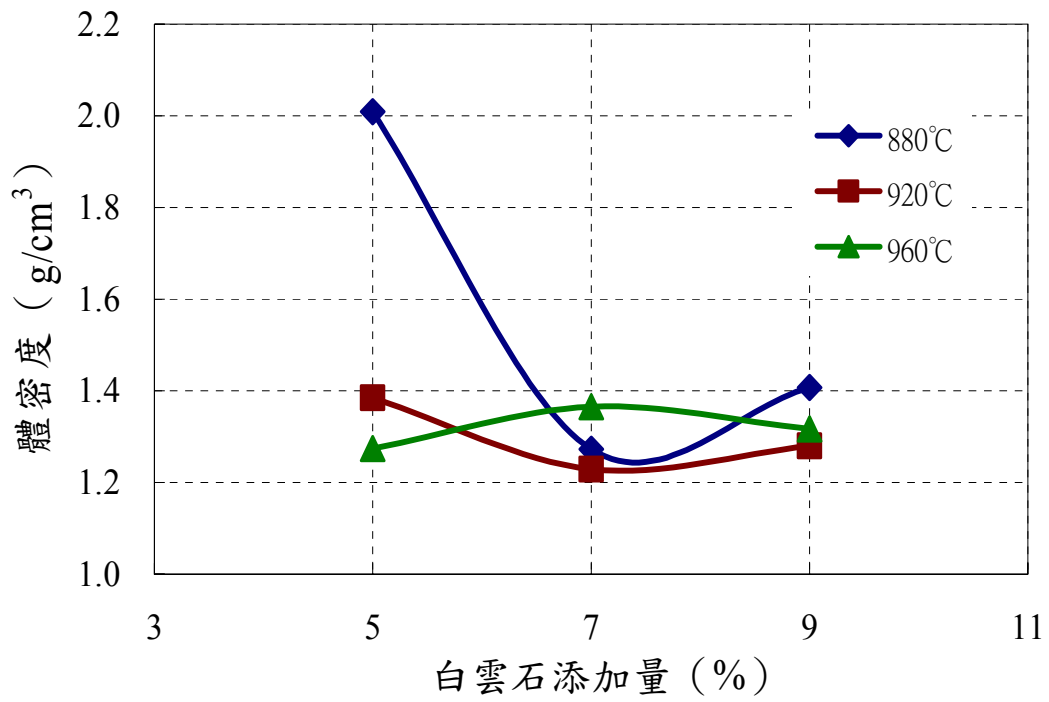


圖 4-10 白雲石添加比例與發泡溫度對泡沫玻璃體密度之關係圖

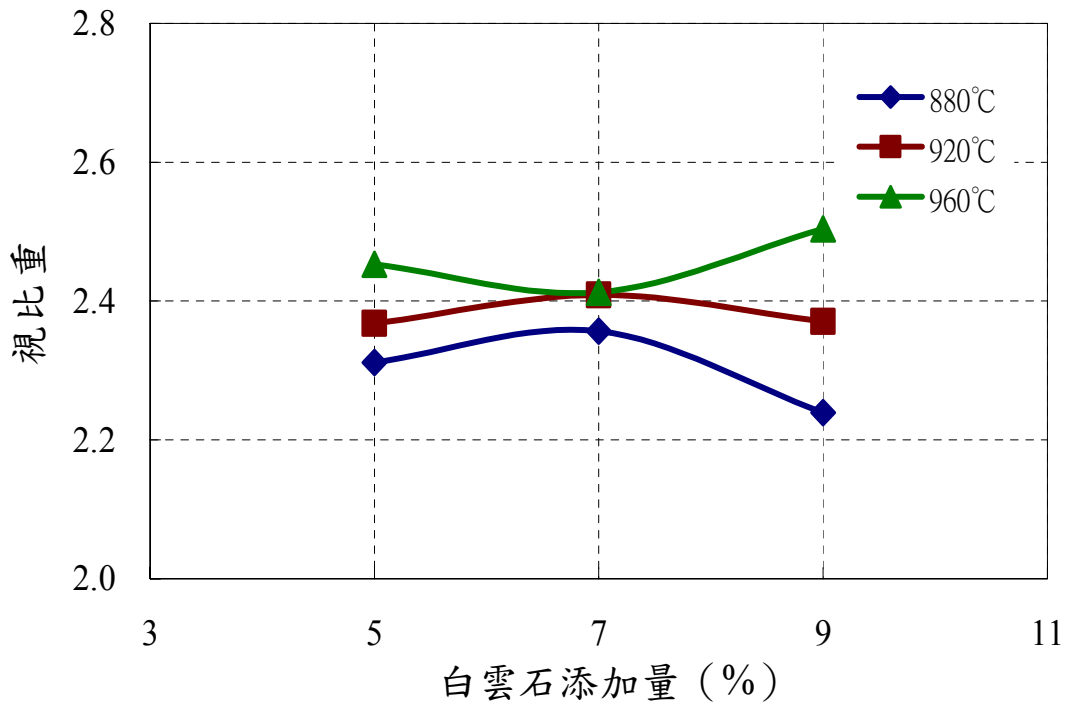


圖 4-11 白雲石添加比例與發泡溫度對泡沫玻璃視比重之關係圖

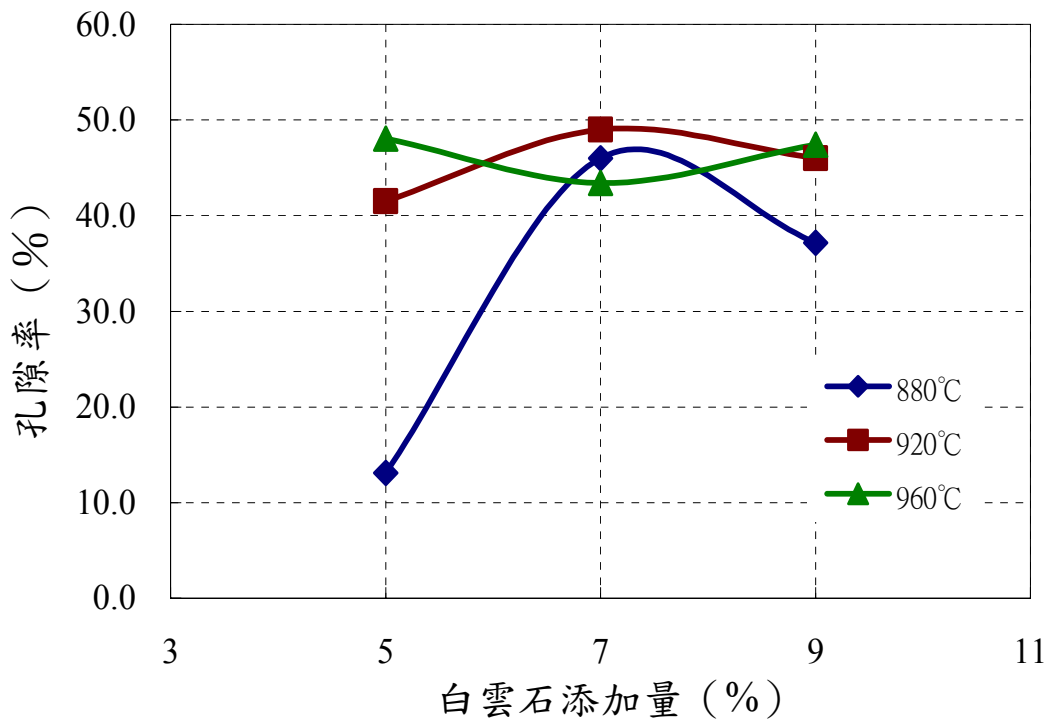


圖 4-12 白雲石添加比例與發泡溫度對泡沫玻璃孔隙率之關係圖

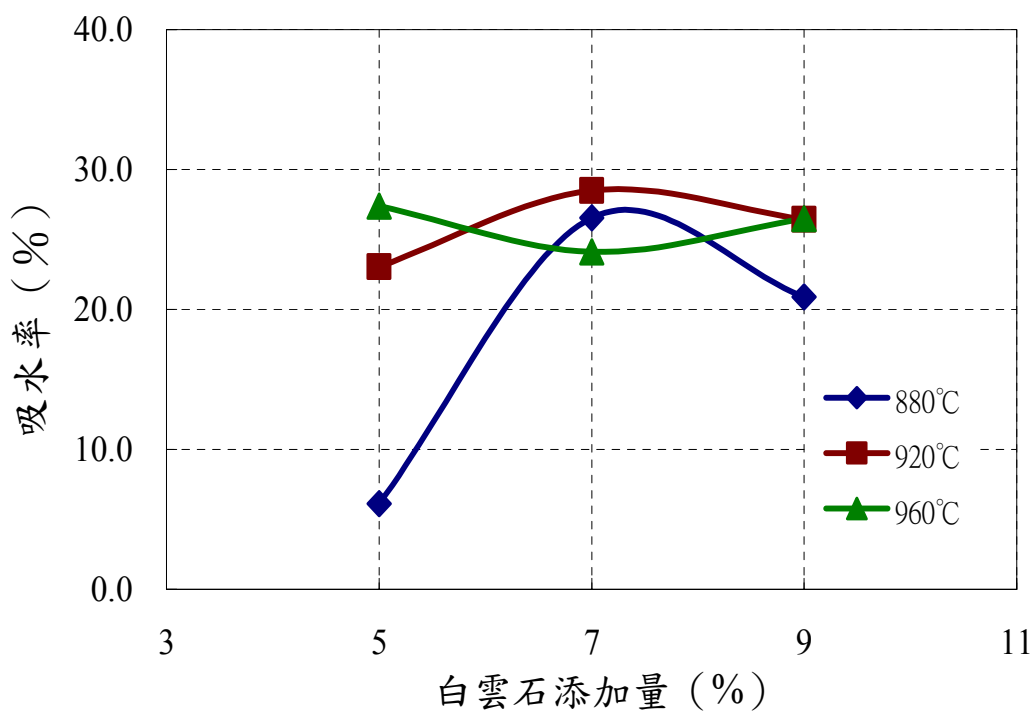


圖 4-13 白雲石添加比例與發泡溫度對泡沫玻璃吸水率之關係圖

4.2.2 發泡溫度對泡沫玻璃機械強度之影響

60mesh 白雲石製程泡沫玻璃抗壓強度試驗結果如圖 4-14 所示，於 880°C 發泡溫度抗壓強度為 18MPa~26MPa 之間，隨發泡劑添加量增加抗壓強度減弱，與泡沫玻璃體密度變化有關。於 920°C 發泡溫度時，抗壓強度約為 16MPa~22MPa 之間，整體抗壓強度較 880°C 小，且於發泡劑 7% 添加量時，抗壓強度較小。當發泡溫度增高至 960°C 時，抗壓強度為 15MPa~17MPa，隨發泡劑添加量增加時抗壓強度並無明顯之變化。

整體而言，當發泡劑添加量固定不變時，隨發泡溫度升高抗壓強度逐漸降低，於 880°C 發泡溫度抗壓強度最佳，因為此時泡沫玻璃產生之孔隙率較低，體密度較高，結構較為緻密，因此機械強度表現上也較為優異。

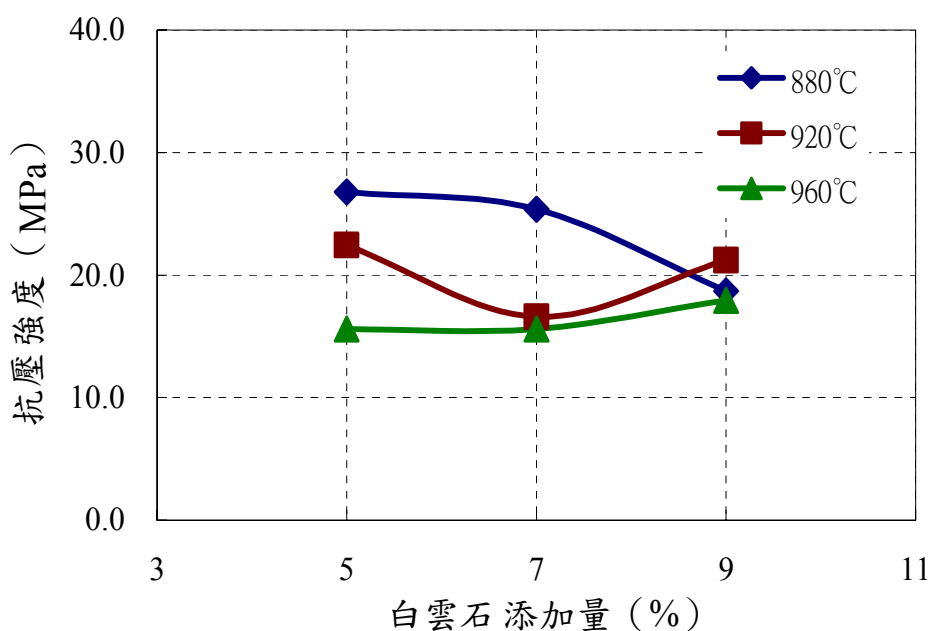


圖 4-14 白雲石添加比例與發泡溫度對抗壓強度之影響

4.3 白雲石粒徑對泡沫玻璃性質之影響

4.3.1 白雲石粒徑對泡沫玻璃基本物理性質之影響

根據前人研究發現，發泡劑的粒度對開始生成氣體的溫度、最大氣體量生成的溫度等均有一定的影響，所以本研究白雲石泡沫玻璃分別以白雲石 60mesh (約 $25\mu\text{m}$) 以下及 100mesh (約 $150\mu\text{m}$) 以下做為發泡劑，探討發泡劑不同粒徑對泡沫玻璃性質之影響，實驗之熱處理條件為 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升溫至 600°C 持溫 30min，再以 $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升溫至 $880^{\circ}\text{C}\sim 960^{\circ}\text{C}$ 發泡溫度，並持溫 30min 後冷卻至室溫製成泡沫玻璃。

1. 白雲石 5% 添加量粒徑對泡沫玻璃基本物理性質之影響

白雲石添加量為 5% 時，分析不同發泡粒徑產生之泡沫玻璃基本物理性質如圖 4-15~圖 4-18 所示，當發泡粒徑為 60mesh 時，隨發泡溫度上升體密度降低，孔隙率及吸水率則升高，視比重則微幅增加，顯示隨溫度升高泡沫玻璃所產生之孔隙大量由封閉孔隙轉變為開放孔隙，因此體密度減小，視比重卻微幅增加。而當發泡粒徑為 100mesh 時，隨溫度升高泡沫玻璃之體密度與視比重皆逐漸減低，孔隙率及吸水率變化則不大。

整體而言，當發泡劑粒徑較小時泡沫玻璃之體密度較小 (圖 4-15)，孔隙率及吸水率較大 (圖 4-17 及圖 4-18)，原因是由於發泡劑添加比例相同

時，粒徑小相對的添加顆粒數多，反應產生之氣體也較多，因此形成之孔隙也較多。然而視比重卻較小（圖 4-16）的原因，是由於發泡劑粒徑小產生之氣泡也較小，於熔渣內部不易連結產生連通孔，因此使得視比重較小。

2. 白雲石 7% 添加量粒徑對泡沫玻璃基本物理性質之影響

白雲石添加量為 7% 時，分析不同發泡劑粒徑產生之泡沫玻璃基本物理性質如圖 4-19~圖 4-22 所示，60mesh 發泡劑粒徑所製成之泡沫玻璃，熱處理溫度為 960°C 時有較大的體密度，孔隙率及吸水率較小，視比重則變化不大，顯示隨溫度升高泡沫玻璃所產生之孔隙較少，因此體密度較高。而發泡劑粒徑為 100mesh 時，泡沫玻璃之體密度、視比重、孔隙率及吸水率變化皆不大。

整體而言，100mesh 白雲石製程泡沫玻璃之孔隙率略大於 60mesh 製程泡沫玻璃（圖 4-21），而吸水率相差不大（圖 4-22），視比重則較大（4-20），與白雲石添加量為 5% 時，有相同之反應情形，原因是由於發泡劑粒徑小產生之氣泡也較小，孔隙率雖較多，但由於封閉孔也較多，因此吸水率並未增加，視比重也較小。

3. 白雲石 9%添加量粒徑對泡沫玻璃基本物理性質之影響

白雲石添加量為 9%時，分析不同發泡粒徑產生之泡沫玻璃基本物理性質如圖 4-23~圖 4-26 所示，60mesh 及 100mesh 白雲石製程泡沫玻璃有相同的變化趨勢，隨熱處理溫度由 880°C 升高至 920°C 時，體密度減小，視比重、孔隙率及吸水率增加，隨溫度升高至 960°C 時，體密度稍微升高，視比重、孔隙率及吸水率稍微減小。

整體而言，100mesh 白雲石製程泡沫玻璃之體密度較 60mesh 製程之泡沫玻璃小（圖 4-23），孔隙率及吸水率較大（圖 4-25 及圖 4-26），原因與發泡劑粒徑小，反應產生之氣體多，孔洞也較多有關。然而 100mesh 白雲石製程視比重較小（圖 4-24）的原因則是由於封閉孔洞較多的關係，與白雲石 5%及 7%添加量泡沫玻璃之基本物理性質有相同的反應變化。

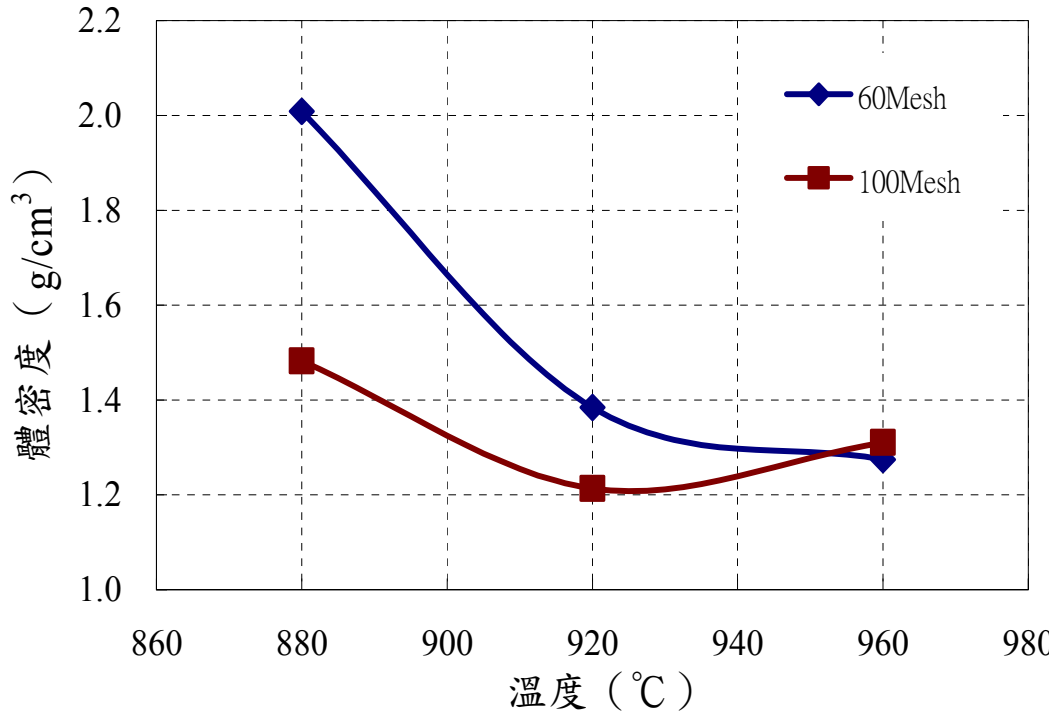


圖 4-15 白雲石 5%添加量時粒徑與發泡溫度對泡沫玻璃體密度之關係圖

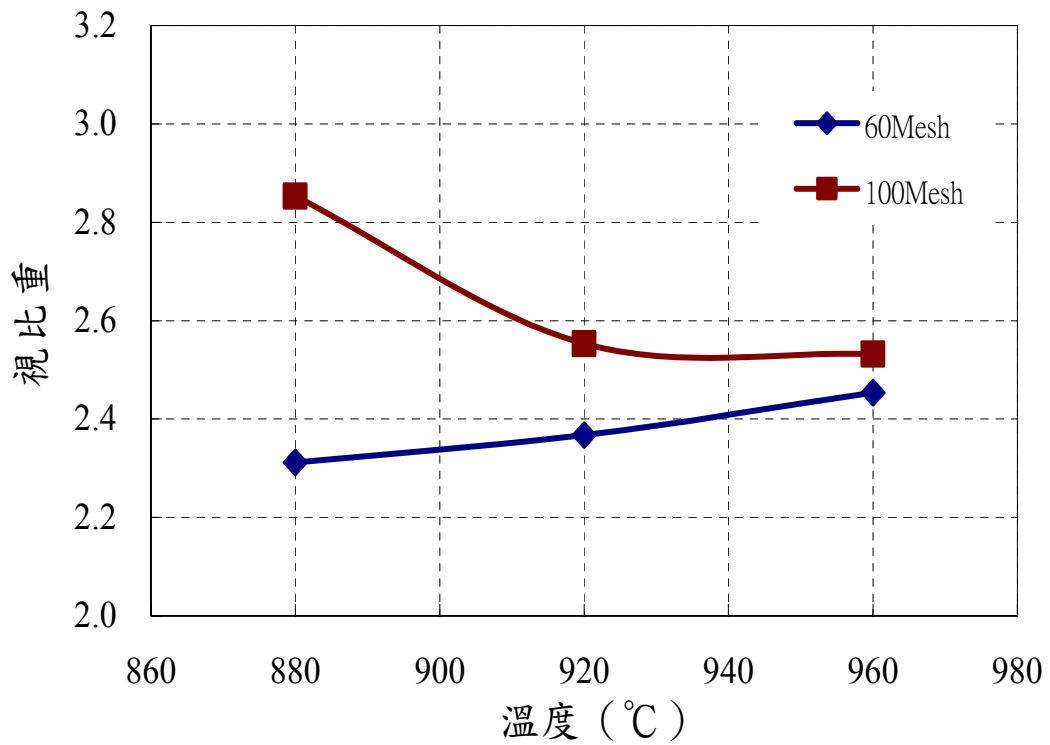


圖 4-16 白雲石 5%添加量時粒徑與發泡溫度對泡沫玻璃視比重之關係圖

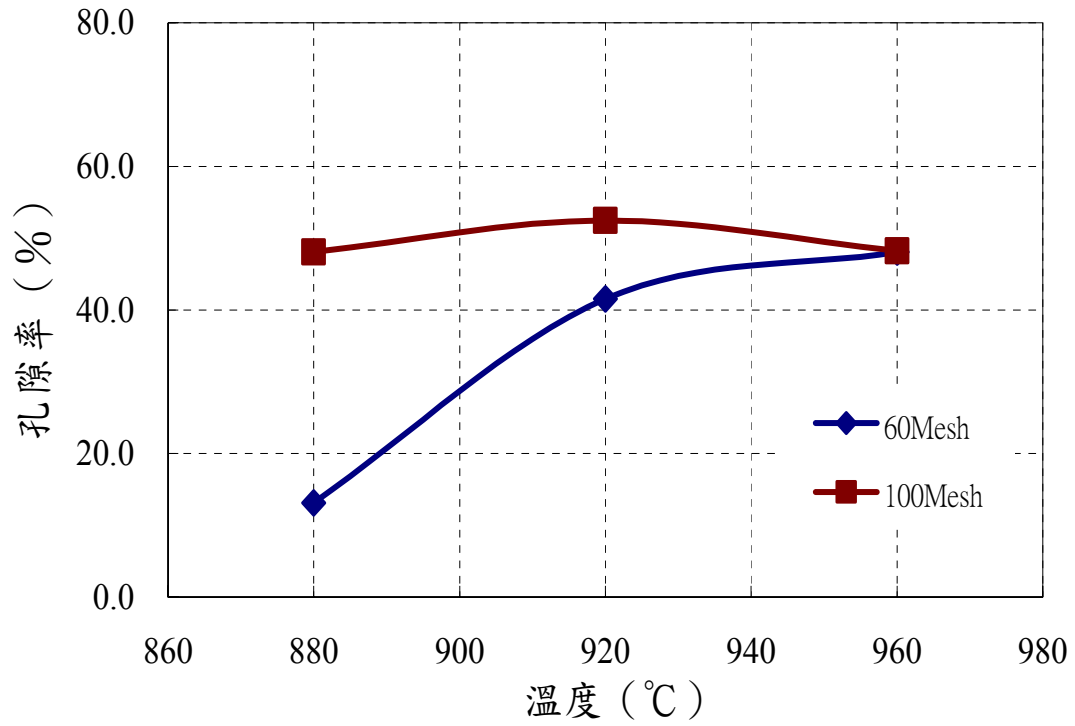


圖 4-17 白雲石 5%添加量時粒徑與發泡溫度對泡沫玻璃孔隙率之關係圖

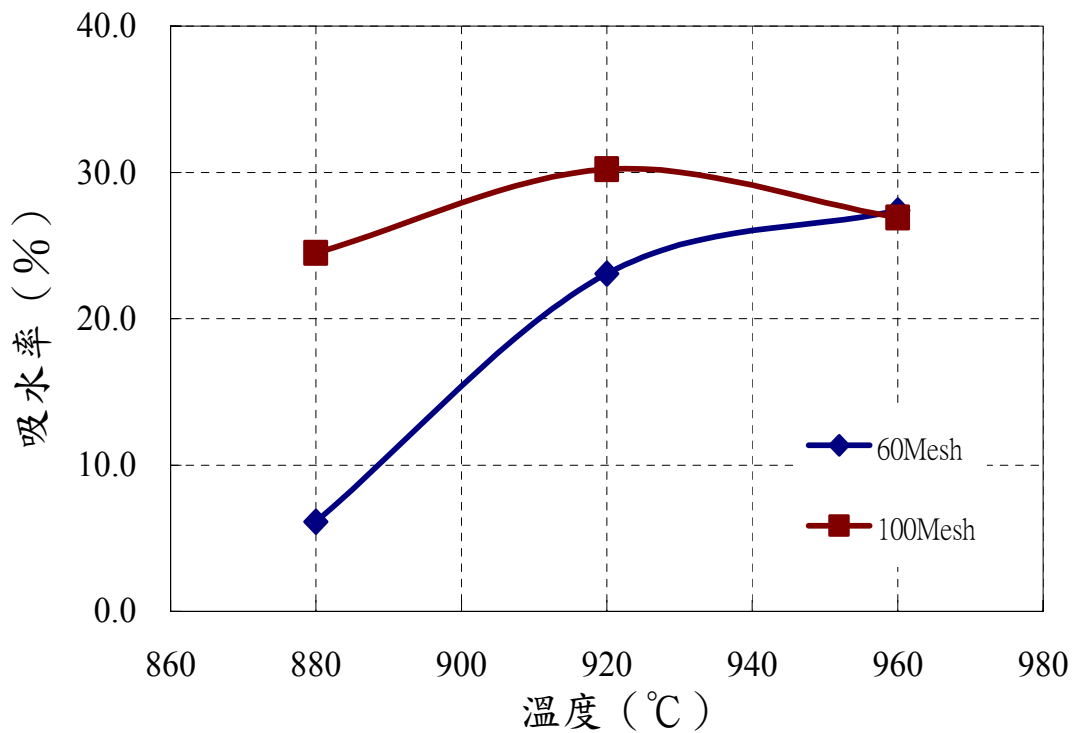


圖 4-18 白雲石 5%添加量時粒徑與發泡溫度對泡沫玻璃吸水率之關係圖

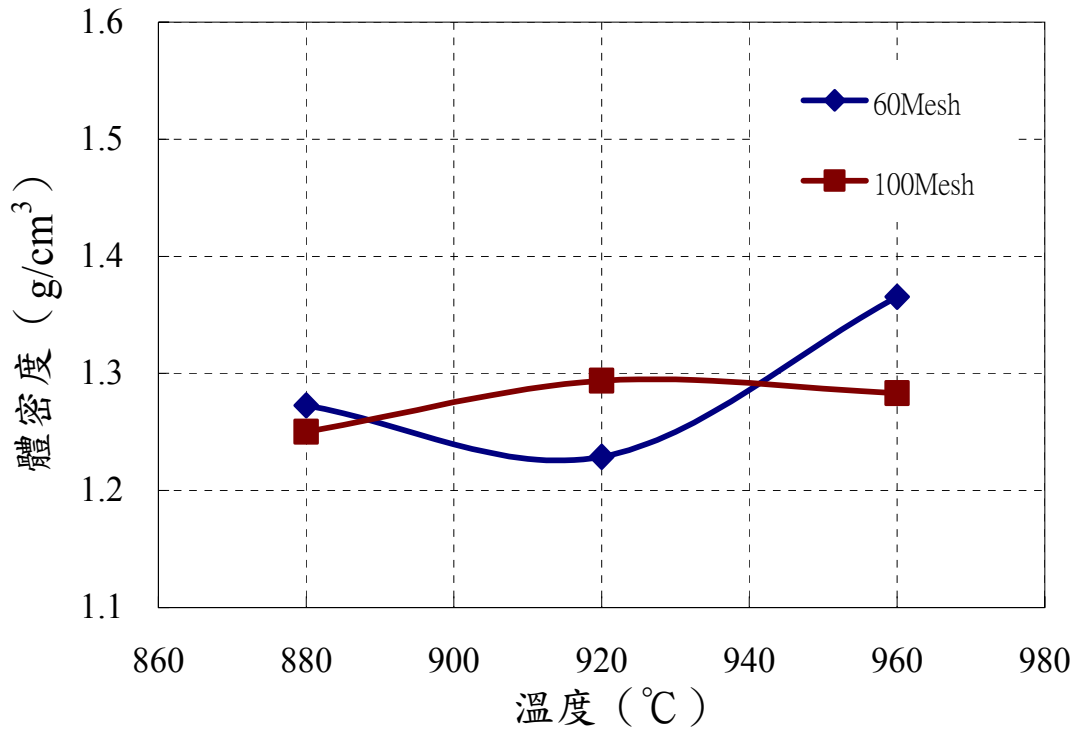


圖 4-19 白雲石 7%添加量時粒徑與發泡溫度對泡沫玻璃體密度之關係圖

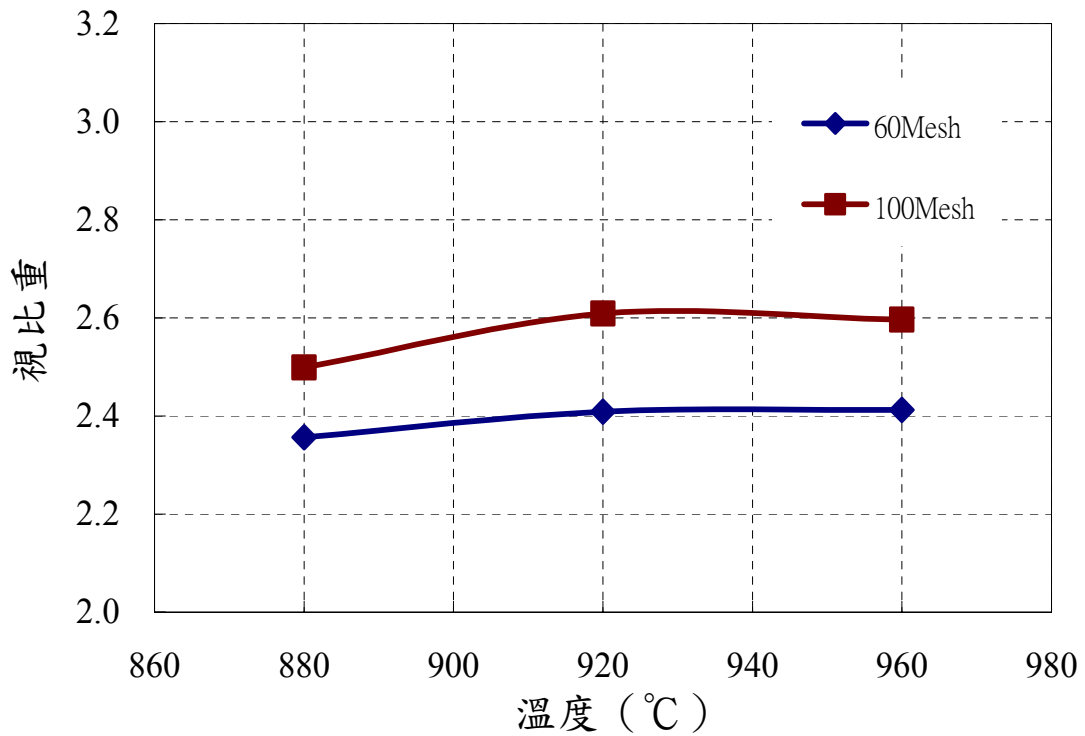


圖 4-20 白雲石 7%添加量時粒徑與發泡溫度對泡沫玻璃視比重之關係圖

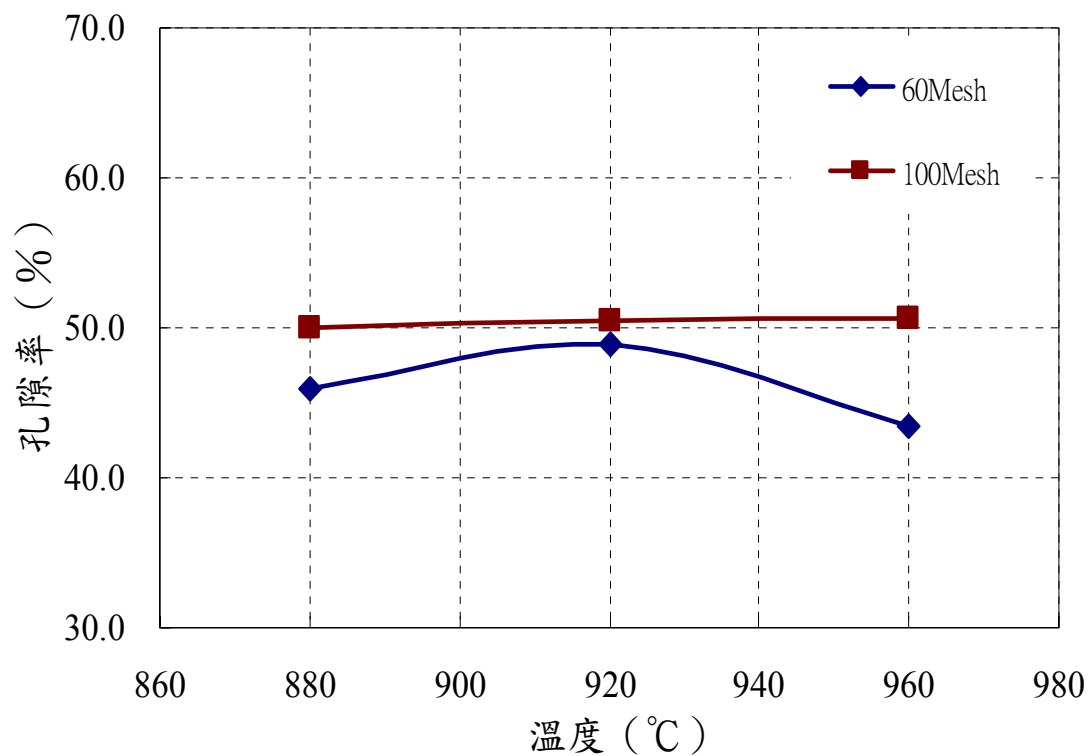


圖 4-21 白雲石 7%添加量時粒徑與發泡溫度對泡沫玻璃孔隙率之關係圖

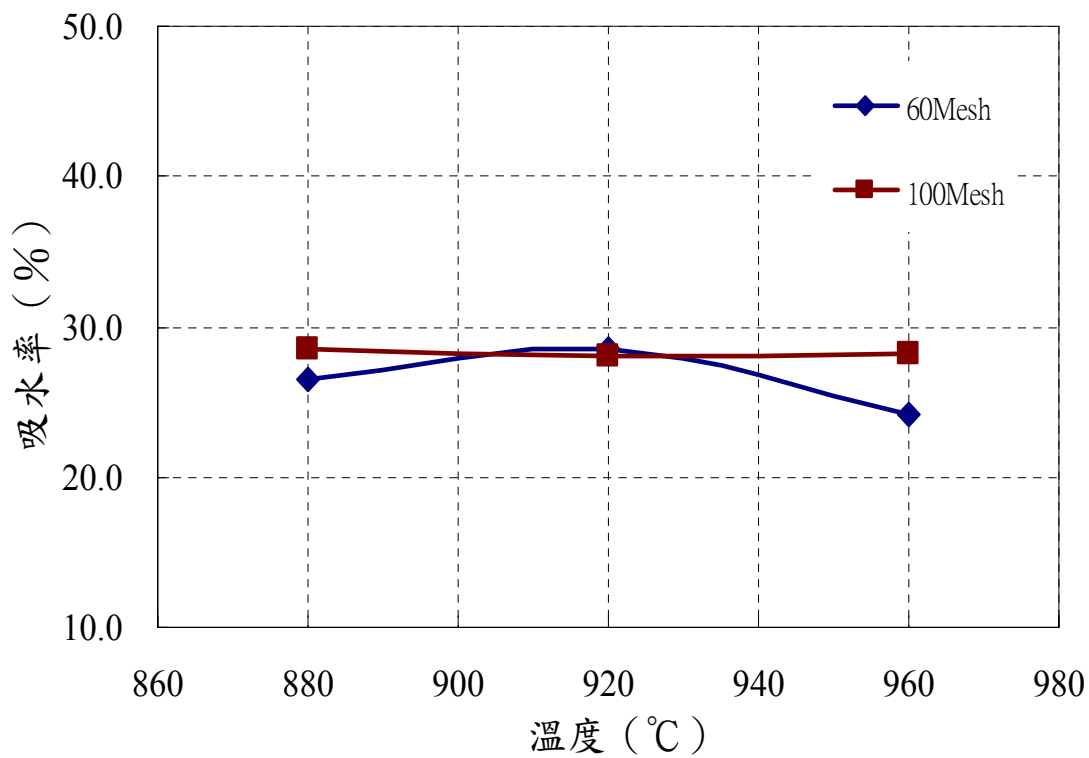


圖 4-22 白雲石 7%添加量時粒徑與發泡溫度對泡沫玻璃吸水率之關係圖

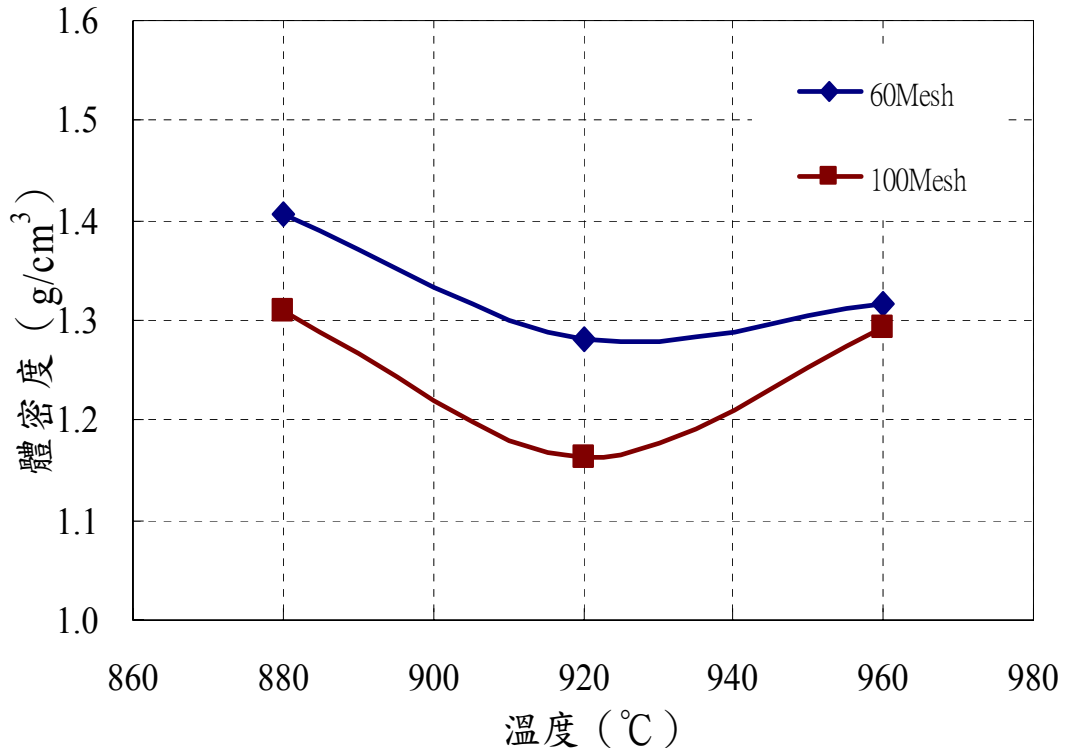


圖 4-23 白雲石 9%添加量時粒徑與發泡溫度對泡沫玻璃體密度之關係圖

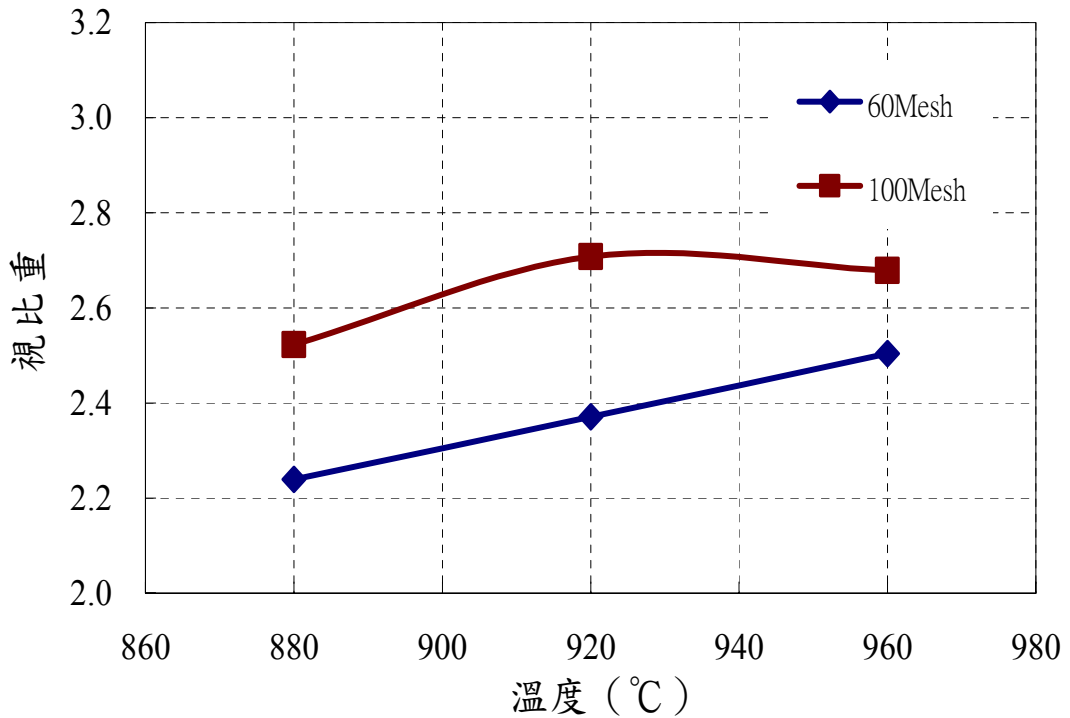


圖 4-24 白雲石 9%添加量時粒徑與發泡溫度對泡沫玻璃視比重之關係圖

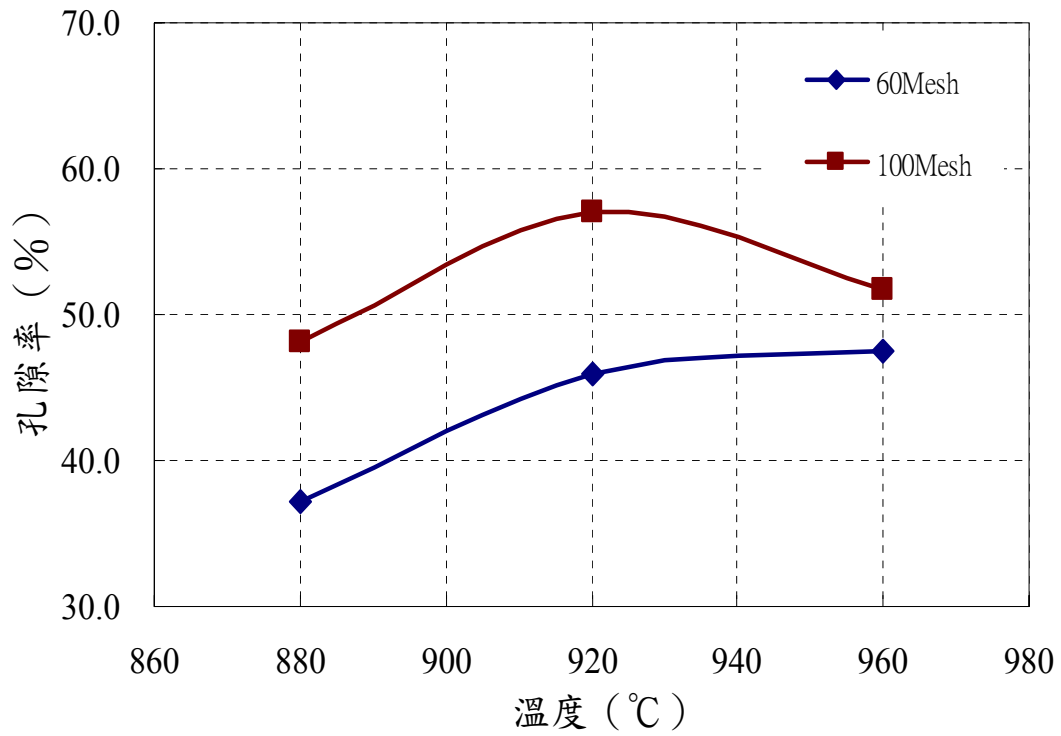


圖 4-25 白雲石 9%添加量時粒徑與發泡溫度對泡沫玻璃孔隙率之關係圖

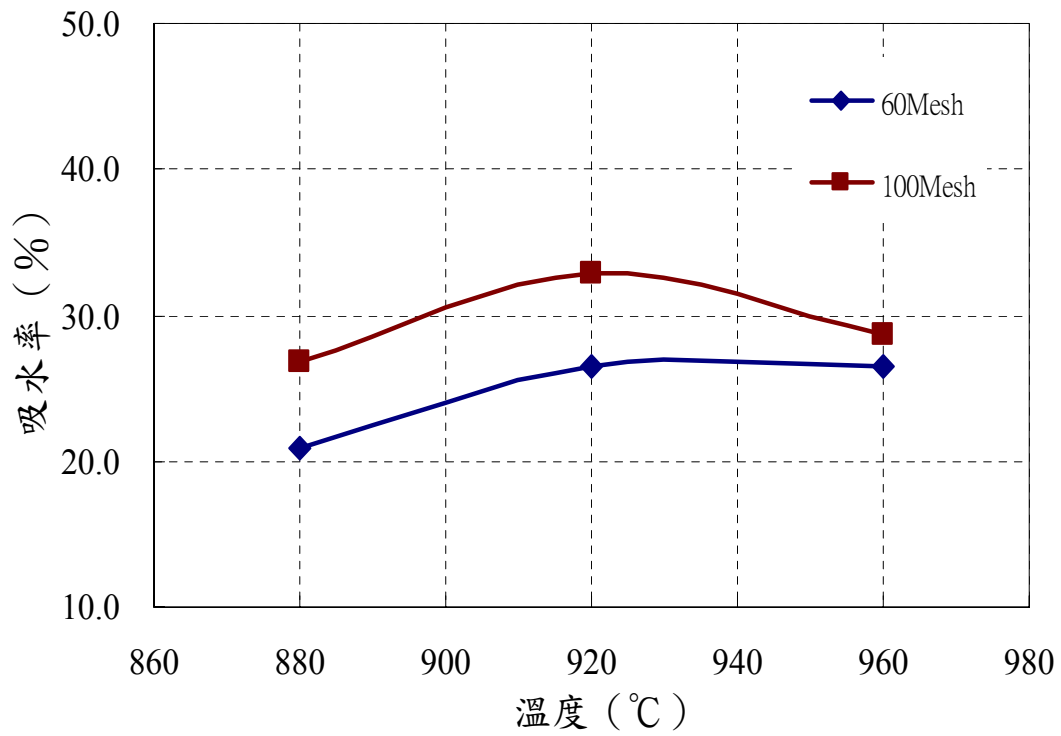


圖 4-26 白雲石 9%添加量時粒徑與發泡溫度對泡沫玻璃吸水率之關係圖

4.3.2 粒徑對泡沫玻璃機械強度之影響

在抗壓強度方面白雲石發泡劑 5% 及 7% 添加量時，粒徑較大的 60mesh 白雲石製程泡沫玻璃隨著溫度升高，抗壓強度降低，而 100mesh 製程則反之(圖 4-27、圖 4-28)，這是由於顆粒越大之發泡劑，隨溫度升高，單一顆粒產生的氣體量也較多，使玻璃熔渣產生之孔隙率增加，孔隙大小較不均一，因此抗壓強度較差；而當發泡劑顆粒較細小，導致開始生成氣體的溫度及生成最大量氣體的溫度均向低端移動，因此較高溫度時孔隙率變化不大(圖 4-17 及圖 4-21)，而泡沫玻璃於較高溫度燒結緻密化程度也較佳，因此機械性質較強。而發泡劑 9% 添加量時，60mesh 之泡沫玻璃則較 100mesh 機械強度略高，而當發泡溫度增加，抗壓強度則變化不大(圖 4-29)。

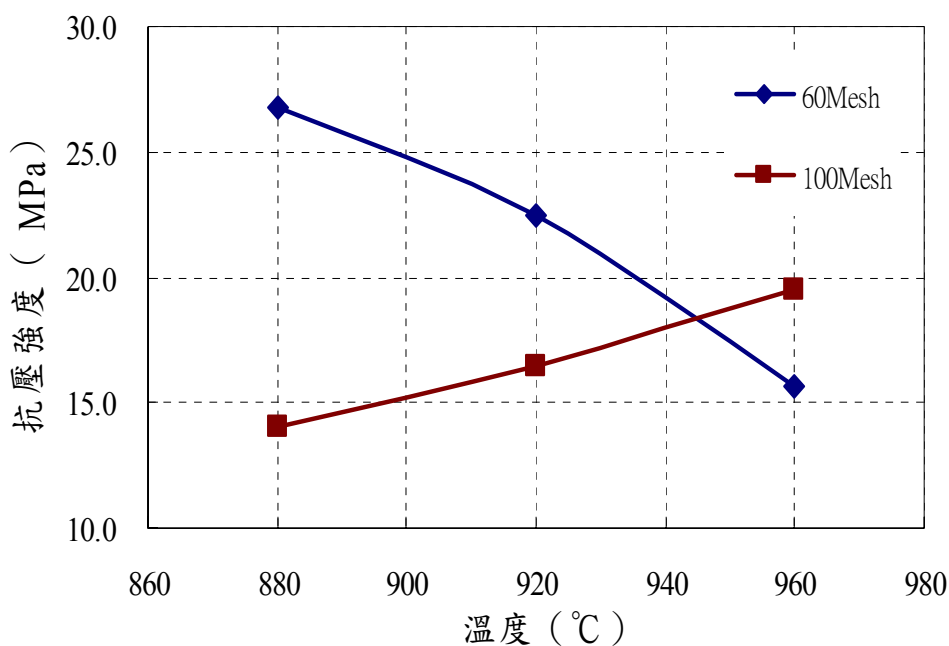


圖 4-27 白雲石 5% 添加量粒徑與發泡溫度對泡沫玻璃抗壓強度之關係圖

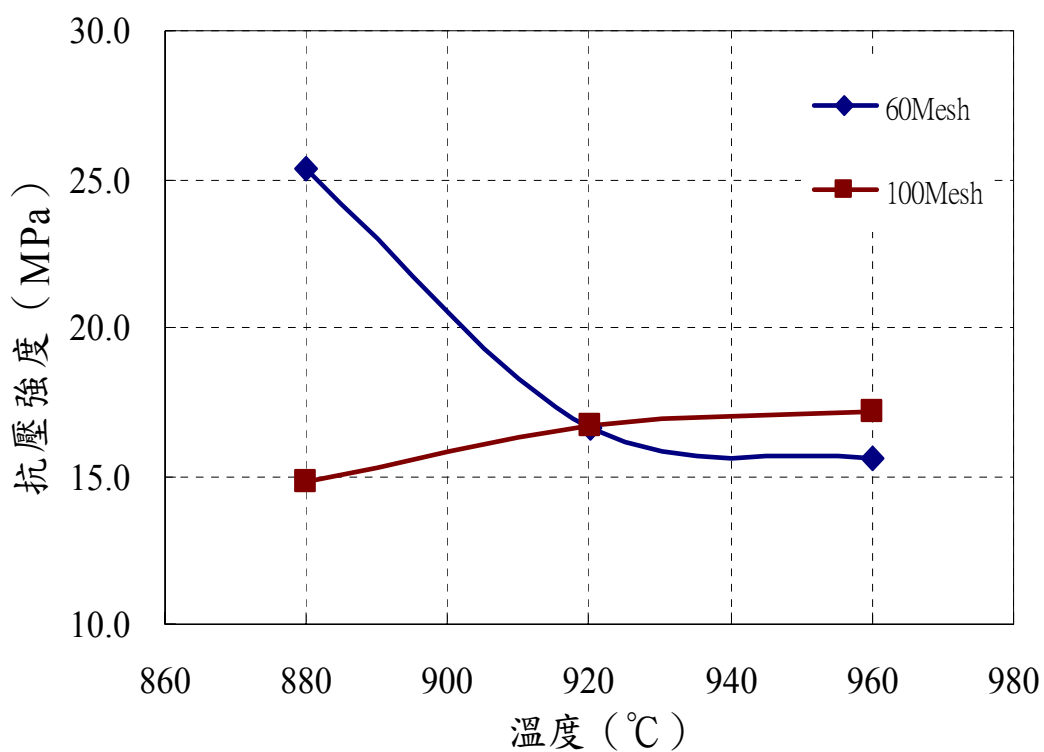


圖 4-28 白雲石 7%添加量粒徑與發泡溫度對泡沫玻璃抗壓強度之關係圖

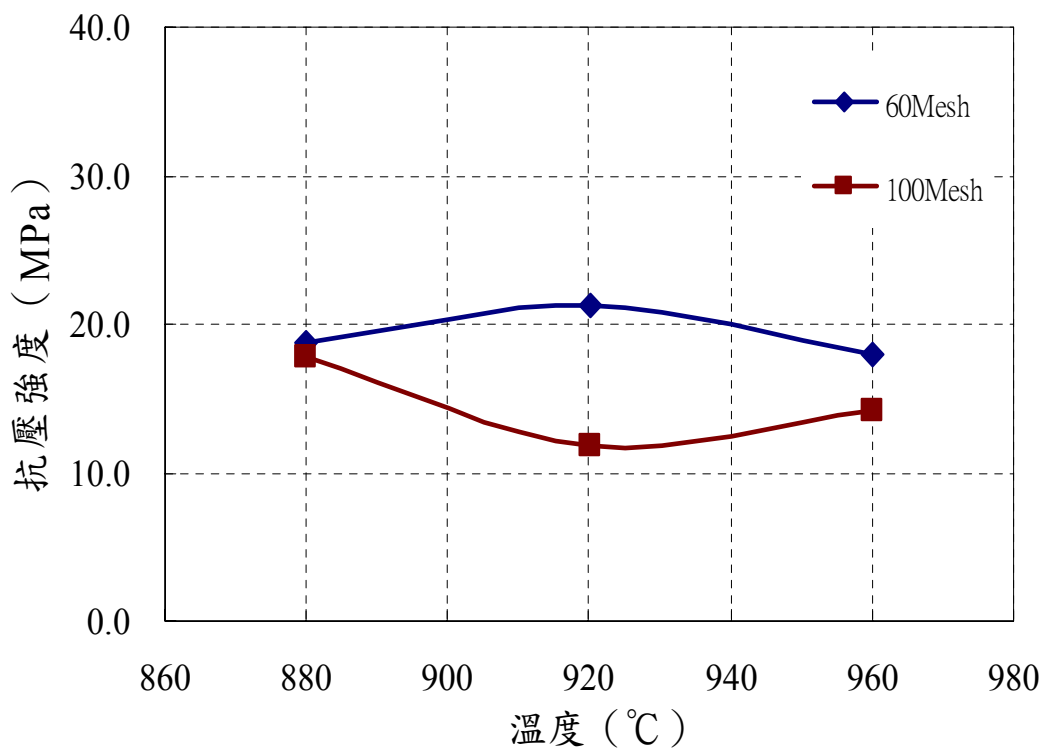


圖 4-29 白雲石 9%添加量粒徑與發泡溫度對泡沫玻璃機械強度之關係圖

4.4 硫酸鈉發泡製程發泡溫度對泡沫玻璃性質之影響

4.4.1 發泡溫度與添加量對泡沫玻璃基本物理性質之影響

本研究硫酸鈉製程泡沫玻璃是以 11 熔渣作為主要原料，加入不同比例之硫酸鈉作為發泡劑，添加一定比例之硼酸、碳酸鈉及水玻璃為助熔劑，磷酸鈉為發泡穩定劑，均勻混合後放入高溫爐進行發泡熱處理，熱處理條件是以 5°C/min 升溫至 100°C 並持溫 20min，再以 20°C/min 升溫至 780°C ~ 920°C 溫度持溫 30min 進行發泡處理，最後於爐內冷卻至室溫產生泡沫玻璃。

硫酸鈉製程泡沫玻璃基本性質分析及發泡情形如表 4-4~表 4-7 所示，泡沫玻璃之體密度為 1.0~1.3g/cm³ 之間，發泡溫度及發泡劑添加量之不同，體密度差異不大，也無一定之變化趨勢（圖 4-30）。視比重則於硫酸鈉 8% 添加量不同發泡溫度有較大的差異，隨添加量逐漸增加至 12% 時，視比重差異也逐漸減小（圖 4-31），於不同發泡劑添加量時孔隙率及吸水率以 820°C 發泡溫度較大，顯示硫酸鈉發泡劑於 820°C 作用溫度時有良好的發泡效果，產生的孔隙率及吸水率大，體密度小，視比重大，孔隙屬於封閉孔隙（圖 4-32 及圖 4-33）。

整體而言，硫酸鈉製程泡沫玻璃與發泡溫度並無明顯之變化趨勢，主

要是因為本製程之泡沫玻璃具有二種發泡劑，除硫酸鈉以外，硼酸之添加除可作為助熔劑以外，亦具有發泡之作用，不同發泡劑將於不同的溫度作用，因此才會使得泡沫玻璃與發泡溫度無明確之變化趨勢。然而，實驗結果顯示硫酸鈉添加量為 8%，發泡溫度為 860°C 時，產生之泡沫玻璃具有低密度，高孔隙率且封閉孔洞較多，具有良好發展潛力，值得進一步加以研究開發。

表 4-4 硫酸鈉添加比例於 780°C 發泡溫度對泡沫玻璃性質之影響





發泡劑	發泡溫度(°C)	添加量(%)	體密度(cm ³ /g)	視比重	孔隙率(%)	吸水率(%)	圖片
硫酸鈉	780°C	6%	1.12	2.32	51.44	45.76	
		8%	1.24	3.01	58.71	47.35	
		10%	1.15	2.84	59.31	51.38	
		12%	1.20	2.85	57.92	48.37	

表 4-5 硫酸鈉添加比例於 820°C 發泡溫度對泡沫玻璃性質之影響





發泡劑	發泡溫度(°C)	添加量(%)	體密度(cm^3/g)	視比重	孔隙率(%)	吸水率(%)	圖片
硫酸鈉	820°C	6%	1.14	2.85	60.06	52.69	
		8%	1.09	3.14	65.14	59.79	
		10%	1.06	2.83	62.60	59.22	
		12%	1.20	2.84	57.65	47.99	

表 4-6 硫酸鈉添加比例於 860°C 發泡溫度對泡沫玻璃性質之影響







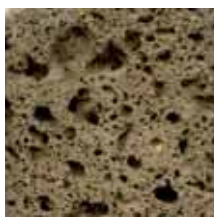

發泡劑	發泡溫度(°C)	添加量(%)	體密度(cm^3/g)	視比重	孔隙率(%)	吸水率(%)	圖片
硫酸鈉	860°C	6%	1.16	2.37	50.96	43.97	
		8%	1.16	2.37	51.17	44.25	
		10%	1.25	2.54	50.91	40.85	
		12%	1.24	2.66	52.97	42.55	

表 4-7 硫酸鈉添加比例於 900°C 發泡溫度對泡沫玻璃性質之影響

發泡劑	發泡溫度(°C)	添加量 (%)	體密度 (cm ³ /g)	視比重	孔隙率 (%)	吸水率 (%)	圖片
硫酸鈉	900°C	6%	1.25	2.31	44.86	37.03	
		8%	1.09	2.75	60.37	55.47	
		10%	1.17	2.78	57.72	49.36	
		12%	1.14	2.80	59.45	52.31	

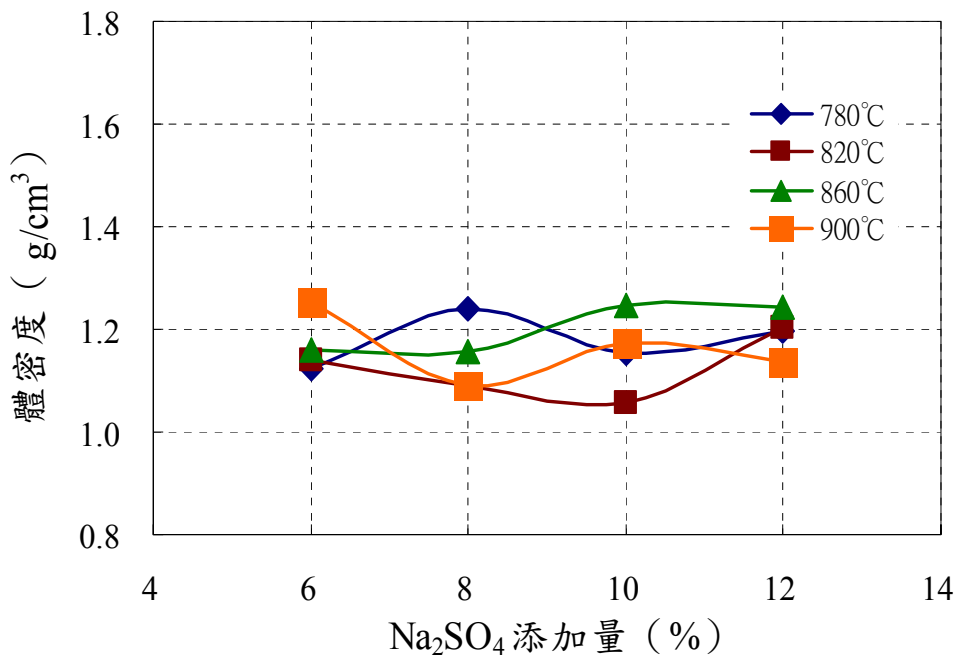


圖 4-30 硫酸鈉發泡劑添加量與發泡溫度對泡沫玻璃體密度之關係圖

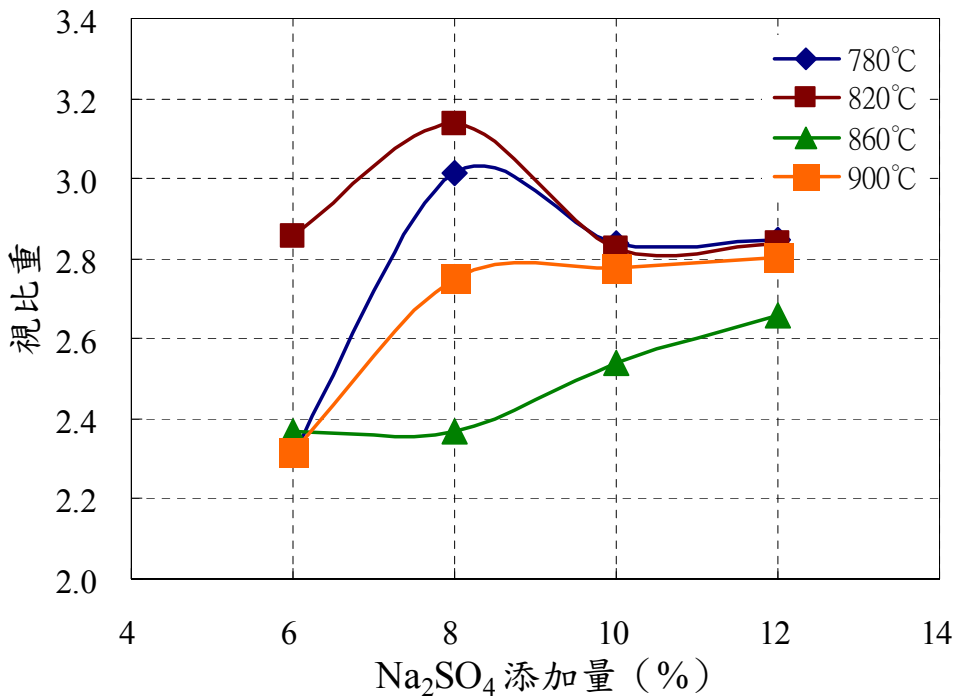


圖 4-31 硫酸鈉發泡劑添加量與發泡溫度對泡沫玻璃視比重之關係圖

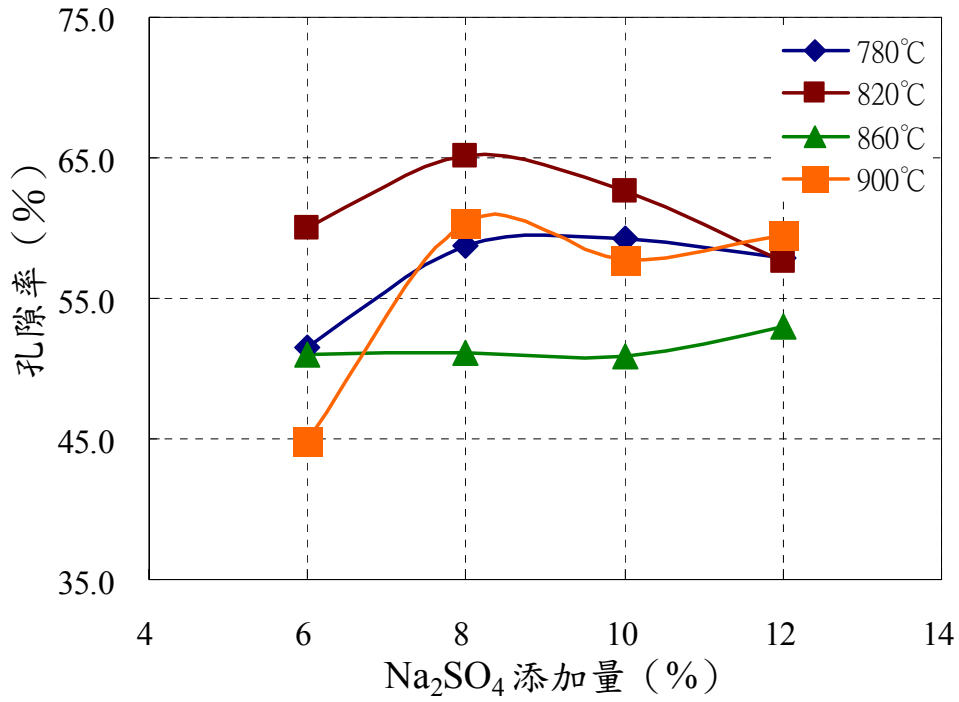


圖 4-32 硫酸鈉發泡劑添加量與發泡溫度對泡沫玻璃孔隙率之關係圖

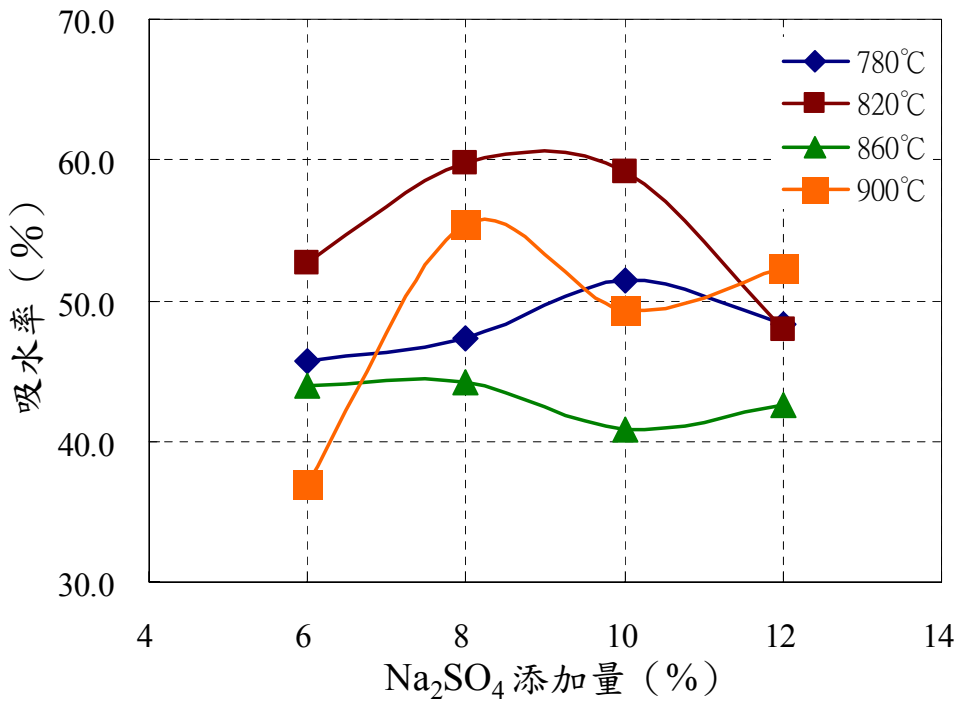


圖 4-33 硫酸鈉發泡劑添加量與發泡溫度對泡沫玻璃吸水率之關係圖

4.4.2 發泡溫度與添加量對泡沫玻璃機械強度之影響

硫酸鈉發泡劑所製成之泡沫玻璃抗壓強度試驗結果如圖 4-34 所示，抗壓強度大小約為 3.5MPa~1.6MPa 之間，以發泡溫度 820°C~860°C 抗壓強度較佳，尤其在發泡溫度 860°C 硫酸鈉添加量 6%~8%，抗壓強度最強。由於硫酸鈉製程之泡沫玻璃發泡效果較佳，產生之孔隙率較大，整體體密度低，材料結構較為鬆散，因此整體抗壓強度明顯較弱。

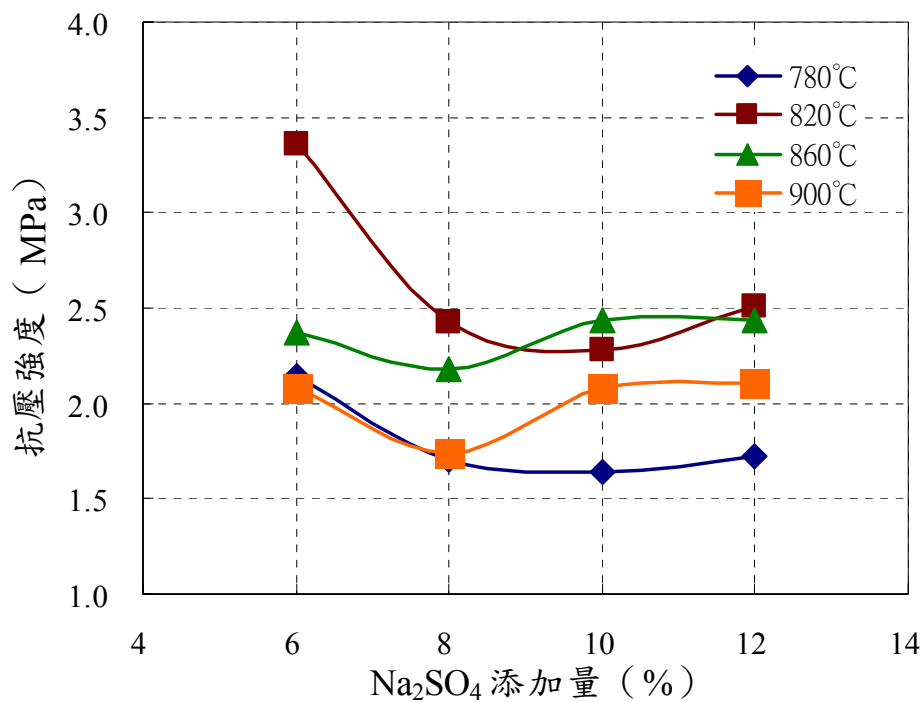


圖 4-34 硫酸鈉發泡劑添加量與發泡溫度對泡沫玻璃抗壓強度之關係圖

4.4.3 發泡溫度與添加量對泡沫玻璃熱傳導率之影響

硫酸鈉發泡製程所產生之泡沫玻璃熱傳導率試驗結果如圖 4-35 所示，不同發泡溫度皆於硫酸鈉添加量 8%~10%之間熱傳導率較高，且大致上有隨溫度升高而增高的趨勢。比較硫酸鈉添加量 6%~8%，於發泡溫度 780°C ~ 820°C 熱傳導率小於 0.3W/mk，860°C ~ 900°C 熱傳導率大於 0.3W/mk。而當硫酸鈉添加量增加為 10%~12%時，隨發泡溫度升高，熱傳導率也逐漸增高，顯示熱傳導率與孔隙率多寡有相對的關係。整體而言，本研究硫酸鈉發泡製程之泡沫玻璃熱傳導率在 0.16~0.4W/mk 之間，相較市售泡沫玻璃性質 0.3~0.4W/mk，相差不大甚至更為優良，顯示本製程之泡沫玻璃有良好的絕熱性質。

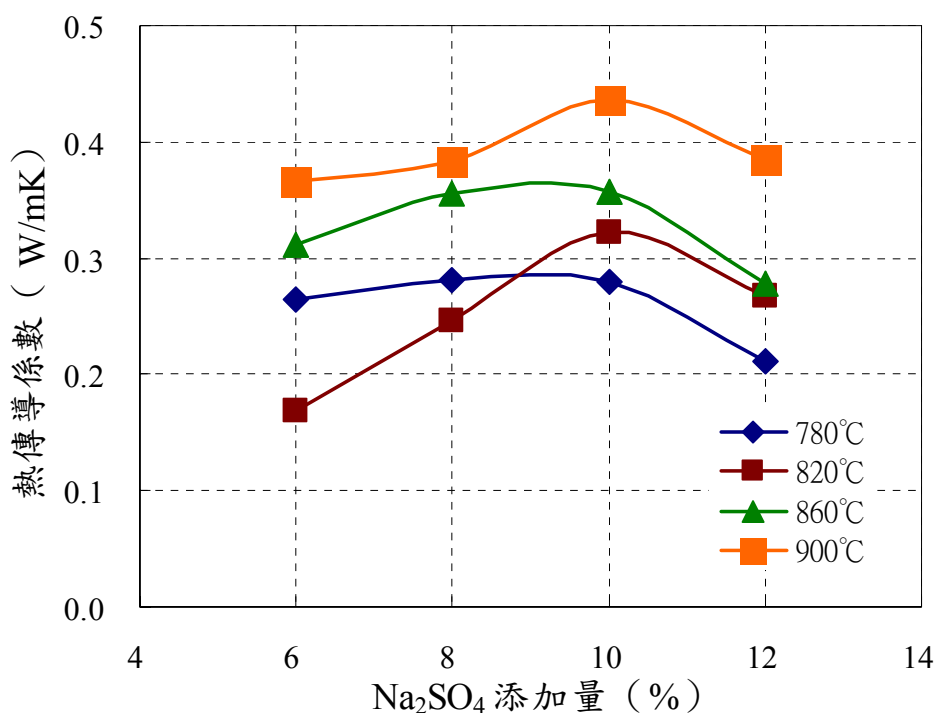


圖 4-35 硫酸鈉發泡劑添加量與發泡溫度對泡沫玻璃熱傳導率之關係圖

4.4.4 泡沫玻璃孔隙率與各項性質之關係

優良的泡沫玻璃結構中應具有大量微小、均一、分佈均勻且為封閉之孔洞，因此發泡良好的泡沫玻璃孔隙率與材料基本物理性質關係密切，將本研究硫酸鈉製程泡沫玻璃之孔隙率與各項性質做比較可以發現，泡沫玻璃體密度隨孔隙率增加而逐漸減小（圖 4-36），因為材料隨孔隙率增加結構變的較為鬆散所致。吸水率隨孔隙率增加含水效果也較高，因此隨孔隙率增加而大幅提高（圖 4-37）。而視比重隨孔隙率增加而增加（圖 4-38），則是因為隨發泡作用於材料內部大量發生時，所產生之封閉孔洞也較多，因此孔隙率增加，視比重亦隨之升高。

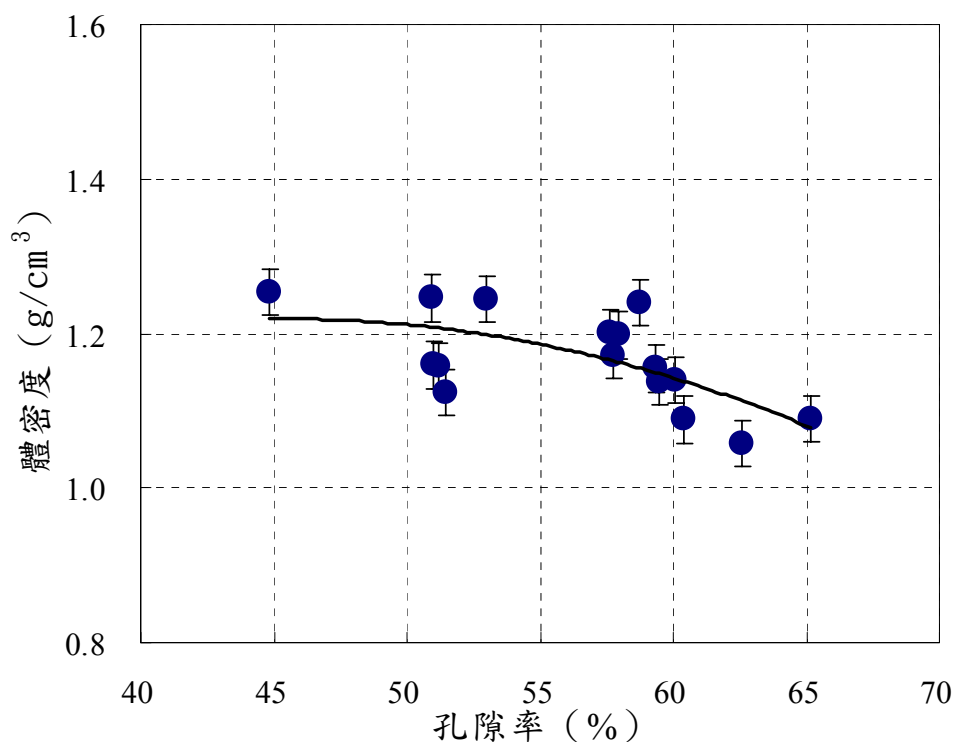


圖 4-36 硫酸鈉製程泡沫玻璃孔隙率與體密度之關係圖

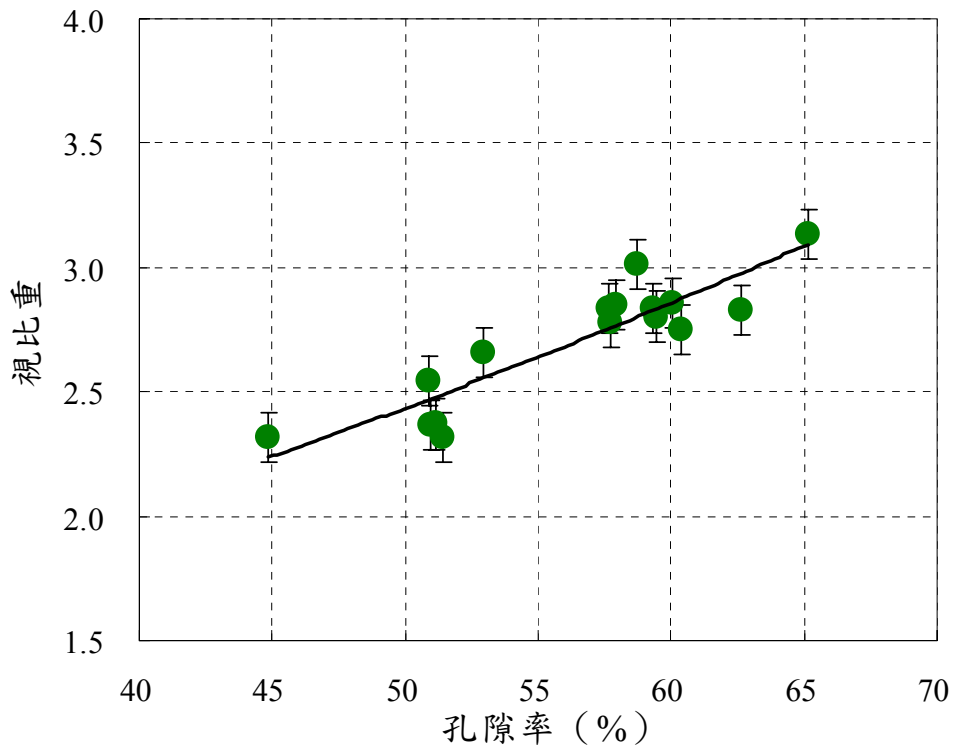


圖 4-37 硫酸鈉製程泡沫玻璃孔隙率與視比重之關係圖

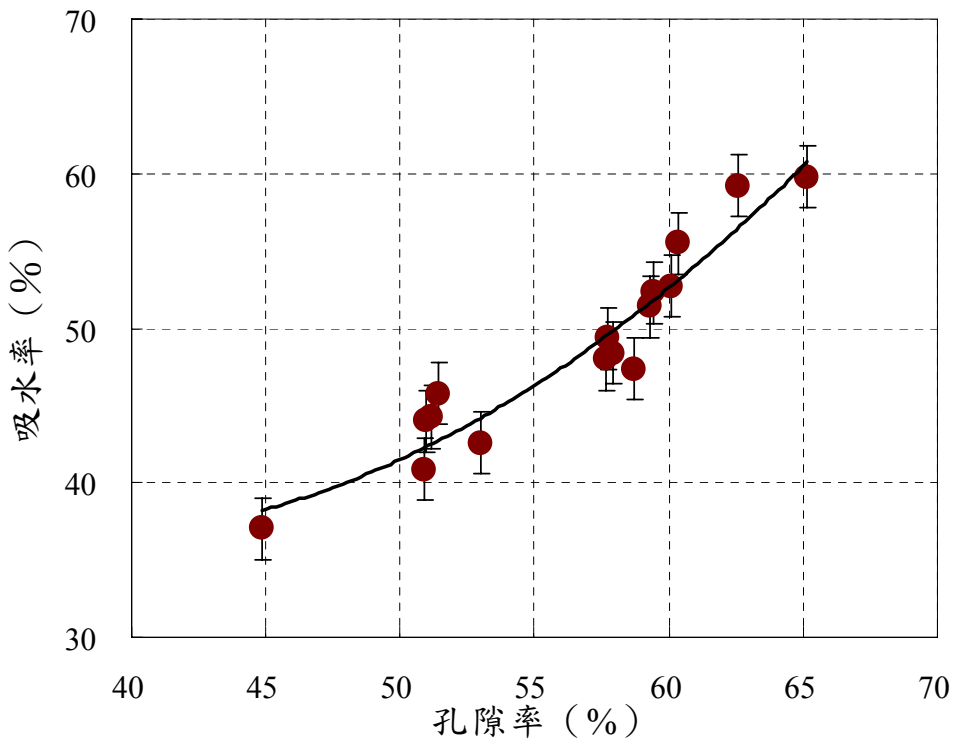


圖 4-38 硫酸鈉製程泡沫玻璃孔隙率與吸水率之關係圖

第五章 結論與建議

5.1 結論

1. 60mesh 白雲石製程之泡沫玻璃最佳發泡劑添加量為 7%~9%，熱處理溫度 880°C~960°C 效果相差不大，可以產生較大之孔隙率且材料密度較小，機械強度良好具有 20MPa 之抗壓強度。
2. 研究結果顯示發泡劑粒徑對於開始產生氣體的溫度、最大氣體量生成的溫度有一定的影響，使用粒徑較小的發泡劑，可以降低氣體生成溫度，並可產生較多孔隙，孔洞小、均一且較多封閉孔洞，因此使用 100mesh 白雲石發泡劑在 880°C~920°C，發泡性質較為良好。
3. 硫酸鈉製程之發泡玻璃具有低熱傳導率，於硫酸鈉添加量 6%~8%，發泡溫度 780°C~820°C 時，熱傳導率最低，約 0.16~0.28 W/mk 之間，相較市售之泡沫玻璃，具有更低之熱傳導率。
4. 使用硫酸鈉發泡劑製成之泡沫玻璃，整體發泡程度良好，產生較大的孔隙率，低密度的性質，尤其在硫酸鈉添加量 6%~8%，發泡溫度 820°C 時，發泡效果最佳，抗壓強度優良並具有低熱傳導率。
5. 整體而言，使用硫酸鈉作為發泡劑發泡效果較白雲石更佳，產生的孔隙率較大，密度較小；但抗壓強度也相對較差。然而硫酸鈉製程由於具有較多產生或控制發泡之添加物，因此發泡程度與狀況也較難掌控。

5.2 建議

1. 泡沫玻璃具有低熱傳導率及低熱膨脹率等優異性質，一般是使用成分單純之玻璃製造。本研究結果顯示，使用水淬熔渣也能產生良好的發泡效果，然而由於熔渣成分較一般玻璃複雜，未來可添加成分較為單純之廢玻璃予以調質處理，製成性質優異之泡沫玻璃。
2. 使用熔渣作為泡沫玻璃之原料需添加合適的發泡劑，方能有效產生發泡作用，然而由於熔渣成分較為複雜，添加發泡劑種類、粒徑大小及熱處理溫度亦對發泡產生重要之影響，目前熔渣內之發泡機制與作用情形尚未能完全掌控，需後續進一步加以探討。

參考文獻

方榮利，劉敏，周元林(2003)，利用粉煤灰研製泡沫玻璃，新型建築材料，第38~40頁。

方榮利，劉敏，周元林(2003)，粉煤灰泡沫玻璃發泡劑的研究，科學實驗，NO.3。

王鯤生等，1997，粒徑大小對焚化飛灰燒結應用之研究，第十二屆廢棄物處理技術研討會論文集，中華民國環境工程學會，pp. 561。

田英良，張友良，田暉，許軍(2003)，利用廢顯像管研製泡沫玻璃，玻璃與搪瓷，第31卷，第4期。

行政院，2004，挑戰：2008國家發展重點計畫(2002-2007)2003.01.06修訂版，國家發展重點計畫研討會議。

行政院環保署網站，2005，<http://www.epa.gov.tw/main/index.asp>

行政院環保署，1999，垃圾焚化灰渣利用之研發建制及推廣計畫(第三年)，EPA-88-U1H1-03-003，行政院環境保護署編印。

行政院環保署，2000，垃圾焚化爐灰渣利用之研發建及推廣計畫(第三年度)都市垃圾焚化爐飛灰電漿熔融處理之評估，EPA-89-U1H1-03-280，行政院環境保護署編印。

行政院環保署，2005，中華民國環境保護統計月報，第197期。

行政院國科會工程處，2003，環工學門簡訊，第 20 期。

李月明，李華，鄒卓辰(2000)，利用廢玻璃研製泡沫玻璃，中國陶瓷工業，第 7 卷第 2 期，第 4~7 頁。

李廣申，王立權 (2002)，利用廢玻璃和高爐渣製作泡沫玻璃的研究，佛山陶瓷，第 12 卷第 8 期，第 14~16 頁。

呂學俊，1977，泡沫玻璃之製造研究，台灣窯業， pp.11-19。

學報，第 18 卷，第 4 期。

侍慕揚，1971，泡沫玻璃之簡介，台灣窯業， pp.16-18。

倪文、李建平、方興、陳德平及陳那那，1998，礦物材料學導論，北京，科學出版社，第 33-34 頁。

姜繼聖、羅玉萍、蘭翔，2002，新型建築絕熱、吸聲材料，化學工業出版社， pp.257-268。

徐惠忠、周明，2001，絕熱材料生產及應用，中國建材工業出版社， pp.129-142。

郭兵，黃家駿，蔡韓英 (2004)，泡沫玻璃在建築節能領域中的應用探討，平原大學學報，第 21 卷，第 3 期。

章裕民，1993，焚化 DIOXINS 形成之解析，第八屆廢棄物處理技術研討會論文集，中華民國環境工程學會，p. 143-153。

陳永翔，2001，焚化灰渣熔融及資源化處理之研究，碩士論文，國立臺北

科技大學材料及資源工程系碩士班。

陳建華，徐風廣，崔益和，焦寶祥（2000），以廢玻璃纖維硬絲為原料研製

泡沫玻璃，新型建築材料，第 15~16 頁。

楊金鐘、陳炫邑，1993，都市垃圾焚化飛灰固化處理控制參數之探討，第

八屆廢棄物處理技術研討會論文集，中華民國環境工程學會，p.

255-269。

楊金鐘、黃靜雯及楊叢印，2000，垃圾焚化飛灰/反應產物合成沸石之資源

化研究，廢棄物資源再生技術研究成果發表會論文集，國科會工程

科技推展中心，第 81-114 頁。

楊金鐘，2004，利用煉鋼廠電弧爐熔融處理垃圾焚化飛灰，93 年度垃圾焚

化飛灰資源化處理在利用技術論壇，第 5-1 - 5-15 頁。

經濟部，2003，焚化灰渣處理技術之探討（二），資源化產業資訊，第 9 期，

技術報導。

趙秀梅（2002），利用廢舊玻璃生產泡沫玻璃，建材技術與應用，第 22~

23 頁。

廖明村及張豐藤，1998，垃圾焚化灰渣處理處置及資源化技術探討，中興

工程，第 60 期，第 125-136 頁。

廖明村，2004，焚化灰渣特性及處理說明，93 年度垃圾焚化飛灰資源化處

理在利用技術論壇，第 2-1 - 2-16 頁。

鄭大偉、江世哲，2003，以廢玻璃製成防火材料之研究，第十八屆廢棄物處理技術論文集，中興大學，台灣台中。

鄭大偉、翁祖炘、朱瑾、曾錦清、杜志謙，2003，焚化灰渣電漿熔融之熔渣資源化技術與特性研究，第十八屆廢棄物處理技術論文集，中興大學，台灣台中。

鍾昀泰、張木彬、黃彩斐，1997，台灣地區一般廢棄物焚化灰份中戴奧辛含量調查研究，第十二屆廢棄物處理技術研討會論文集，中華民國環境工程學會，p. 1。

Akaishi, N., 2002, "Lightweight Heat-Insulating Building Material Having Forst Resistance", United States, Patent Application Publication.

Barbieri L., Lancellotti I., Manfredini T., Queralt I., Rincon J. Ma., and Romero M., 1999, Design, obtainment and properties of glasses and glass-ceramics from coal fly ash, *Fuel*, 78, pp.271-276.

Barbieri L., Corradi A., and Lancellotti I., 2000, Bulk and sintered glass-ceramics by recycling municipal incinerator bottom ash, *Journal of the European Ceramic Society*, 20, pp.1637-1643.

Boccaccini, A. R., Kopf, M. and Stumpfe, W., 1995, Glass-ceramics from filter dusts from waste incinerators, *Ceramics International*, Vol.21, pp.231-235.

Cheng, T. W., Chu. J. P., Tzeng, C. C. and Chen, Y. S., 2002, "Treatment and recycling of incinerated ash using thermal plasma technology", *Waste Management*, Vol. 22, pp. 485-490.

- Cheng, T. W., 2003, Combined glassification of EAF dust and incinerator fly ash, *Chemosphere*, Vol. 50, pp. 47-51.
- Cheng, T. W. and Chen, Y. S., 2003, On formation of CaO-Al₂O₃-SiO₂ glass-ceramics by vitrification of incinerator fly ash, *Chemosphere*, Vol. 51, pp. 817-824.
- Colombo, P., Brusatin, G., Bernardo, E. and Scarinci, G., 2003, Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products, *Current Opinion Solid State & Materials Science*, Vol. 7, pp. 225-239.
- Dejaiffe, R., Young, M., 2003, “Foam Glass and Method of Making”, United States, Patent Application Publication.
- Eighmy, T. T. and Kosson, D. S., 1996, U.S.A. National overview on waste management, *Waste Management*, Vol. 16, pp. 361-366.
- Hurley, J., 2003, “A UK Market Survey for Foam Glass(GLA-0015)”, WARP(the Waste & Resources Action Programme), pp.114.
- Karamanov, A., Pelino, M., Salvo, M. and Metekovits, I., 2003, Sintered glass-ceramic from municipal solid waste-incinerator fly ashes—part I: the influence of the heating rate on the sinter-crystallisation, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 23, pp. 827-832.
- Kim, J., Kim, H. S., 2004, Glass-ceramic produced from a municipal waste incinerator fly ash with high Cl content, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 24, pp. 2373-2382.
- Kosson, D.S., Sloot, H.A. van der and Eighmy, T. T., 1996, An approach for estimation of contaminant release during utilization and disposal of municipal waste combustion residues, *Journal Hazardous Materials*, Vol.

47, pp. 43-75.

Lee, S.Y., 2003, "Method of Producing Foam Glass for Refractory Thermal Insulation Material", United States, Patent Application Publication.

Marabini A.M., Plescia P., Maccari D., Burrigato F., and Pelino M., 1998, New materials from industrial and mining wastes: glass-ceramics and glass-and rock-wool fibre, *Int. J. Miner. Process.*, 53, pp.121-134.

Ovecoglu M.L., 1998, Microstructural Characterization and Physical Properties of a Slag-based Glass-ceramic Crystallized at 950 and 1100°C, *Journal of the European Ceramic Society*, 18, pp.161-168.

Park, Y. J. and Heo, J. 2002, Nucleation and crystallization kinetics of glass derived from incinerator fly ash waste, *Ceramics International*, Vol. 28, pp. 669-673.

Rincon, J. MA., Romero, M. and Boccaccini, A. R., 1999, Microstructural characterization of a glass and a glass-ceramic obtained from municipal incinerator fly ash, *Journal of Materials Science*, Vol. 34, pp. 4413-4423.

Romero M., Rawlings R.D. and Rincon J.Ma., 1999, Development of a New Glass-Ceramic by Means of Controlled Vitrification and Crystallisation of Inorganic Wastes from Urban Incineration, *Journal of the European Ceramic Society*, 19, pp.2049-2058.

Wiles, C. C., 1996, "Municipal Solid Waste Combustion Ash: State-of-the-knowledge", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 47, pp. 325-344.